
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



Měření svěrné síly automobilových brzd

**Measurement of compression strength
of automobile brakes**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Václav Málek

Leden 2012

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



Obor 2302T010

Konstrukce strojů a zařízení

Zaměření

Kolové dopravní a manipulační stroje

Měření svěrné síly automobilových brzd

**Measurement of compression strength
of automobile brakes**

Diplomová práce

KVM – DP – 621

Václav Málek

Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Pavel Němeček

Konzultant diplomové práce: Ing. Bronislav Růžička, TRW Lucas Varity

Počet stran: 53

Počet obrázků: 73

Počet příloh: 6

Počet výkresů: 2

Leden 2012



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Katedra vozidel a motorů

Studijní rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Bc. Václav M Á L E K
studijní program	N2301 Strojní inženýrství
obor	2302T010 Konstrukce strojů a zařízení
zaměření	Kolové dopravní a manipulační stroje

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

MĚŘENÍ SVĚRNÉ SÍLY AUTOMOBILOVÝCH BRZD

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

- 1) Seznamte se s problematikou měření svěrných sil v oddělení CASE.
- 2) Navrhněte možnosti měření svěrné síly na automobilových kotoučových brzdách za provozu vozidla. Preferujte řešení bez mechanického zásahu do měřeného objektu (brzdy). Měření by mělo umožnit sledování silových změn na automobilové kotoučové brzdě přímou metodou (svěrná síla) resp. alternativní metodou (např. poloha brzdové destičky) a napomoci tak k lepšímu zmapování silových účinků na brzdu.
- 3) Proved'te návrh metodiky měření včetně adaptéru nebo přípravku pro uchycení snímače. Dle možnosti jednotlivé návrhy ověřte praktickým měřením a výsledky vyhodno'te.
- 4) Vyberte nejvhodnější řešení, na které vypracujte výkresovou dokumentaci, vč. metodického předpisu.
- 5) Cílem diplomové práce je návrh metodiky uplatnitelný ve firmě TRW Automotive Czech s.r.o. Jablonec nad Nisou.

Forma zpracování diplomové práce:

Průvodní zpráva: cca 50 stran textu vč. příloh dílčích výsledků.

K tištěným svazkům originálu diplomové práce bude přiložena výkresová dokumentace.

Text celé diplomové práce včetně příloh a výkresů bude v elektronické formě přiložen na CD nosiči ke svazku diplomové práce.

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

- | 1 | Vlk, F. : Podvozky motorových vozidel. Nakladatelství a vydavatelství VLK. Brno 2000
- | 2 | Červinka, O. aj.: Stroje a zařízení pro průmyslovou dopravu. Skriptum VŠST, Liberec 1986
- | 3 | Svoboda, J.: Teorie dopravních prostředků. Vozidla silniční a terénní. Skriptum ČVUT, Praha 1986
- | 4 | Šalamoun, Č.: Motorová vozidla IV. Skriptum ČVUT, Praha 1991
- | 5 | Fenton, J.: Handbook of Automotive Body Construction and Design Analysis. Professional Engineering Publishing, Ltd., Suffolk (UK) 1998

Zadání vzniklo ve spolupráci s TRW Automotive Czech s.r.o. Jablonec nad Nisou.

Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Pavel Němeček - TU v Liberci, KVM

Konzultant diplomové práce: Ing. Bronislav Růžička, TRW Automotive –
Foundation Brakes

L.S.

prof. Ing. Celestýn Scholz, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.
děkan

V Liberci dne 1. 11. 2010

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ).
Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

Měření svěrné síly automobilových brzd

Anotace

Cílem je navrhnout a realizovat způsob měření svěrné síly na automobilových kotoučových brzdách za provozu vozidla. Toto měření by mělo umožnit sledování silových změn na automobilové kotoučové brzdě a napomoci k lepšímu zmapování silových účinků na brzdu. Preferovaným řešením bude měření bez mechanického zásahu do měřeného objektu v našem případě brzdy.

Klíčová slova: svěrná síla, brzda, kotoučová brzda

Measurement of compression strength of automobile brakes

Annotation

The aim is to design and implement a method of measuring the compression forces on automotive disc brakes for vehicle traffic. This measure should allow monitoring of changes in automotive power disc brakes and help to better map the effects of force on the brake. The preferred solution is the measurement without mechanical intervention in the measured object in our case the brakes.

Key words: clamping force, brake, disc brake

Desetinné třídění:

Zpracovatel:

TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů

Dokončeno :

2012

Archivní označení zprávy:

Prohlášení k využívání výsledků diplomové práce

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom(a) povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V dne

.....

podpis

Poděkování

Nejvíce bych rád poděkoval firmě TRW Lucas Varity s.r.o. Jablonec nad Nisou, za umožnění řešení zadané diplomové práce a konzultace se zaměstnanci firmy, kteří se v dané problematice věnují delší dobu. Jmenovitě Ing. Bronislavu Růžičkovi, Rudolfu Šrámkovi a dalším spolupracovníkům, za pomoc při úpravě a montáži brzdy.

Za podněty panu Švecovi z firmy Kistler a panu Zůbkovi z firmy Devetron,

Dále bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Dr. Ing. Pavlu Němečkovi za vedení práce a rady při vypracování.

V neposlední řadě děkuji své rodině za trpělivost a velkou podporu v průběhu mého studia.

Poděkování patří i těm, kteří se i minimální měrou podílely, radou nebo připomínkou přestože zde nejsou jmenováni.

Seznam symbolů a jednotek

F	síla - obecně	[N]
FB	brzdná síla	[N]
k	tuhost deformačního členu	[N/m]
E	Youngův modul	[MPa]
P	výkon	[W]
R	označení tenzometrů (odpory)	[Ω]
U _n	napájecí napětí můstku	[V]
M _k	maximální zbytkový moment	[Nm]
M _k	maximální hlavní brzdny moment	[Nm]
M _B	maximální brzdny moment	[Nm]
f	koeficient tření	[-]
Of	odpor valení	[N]
Ov	odpor vzduchu	[N]
Os	odpor setrvačnosti	[N]
Oα	odpor stoupání	[N]
I	moment setrvačnosti	[kgm ²]
ε	úhlové zrychlení	[rad·s ⁻²]
S	plocha elektrod	[m ²]
d	vzdálenost elektrod	[Nm]
ε ₀	permitivita vakua	[F/m]
ε _r	relativní permitivita	[F/m]
Cs	kapacita	[F]
K _p	piezoelektrická konstanta	[C N ⁻¹]

Obsah

1. Úvod	
1.1 Cíl a požadavky na měření.....	10
1.2 Historie podniku TRW	10
2. Popis konstrukce brzdy.....	12
2.1 Postupný vývoj kotoučové brzdy	12
2.2 Popis konstrukce brzdy.....	13
2.3 Síly vznikající na brzdě.....	18
3. Měření kapacitním snímačem.....	19
3.1 Popis funkce kapacitního snímače.....	19
3.2 Zkušební měření kapacity vyrobeným snímačem.....	20
4. Měření zbytkového momentu.....	23
4.1 Zkušební přístroj pro měření zbytkového momentu	23
4.2 Měření zbytkového momentu pomocí programu DIADEM.....	24
5. Využití metody konečných prvků při umístění snímače.....	25
5.1 Postup a zjištění maximální deformace třmenu.....	25
5.2 Zjištění optimální polohy pro snímače.....	27
6. Měření piezoelektrickým snímačem.....	28
6.1 Princip piezoelektrického snímače.....	28
6.2 Příprava kalibrace snímačů.....	30
6.3 Použití programu DEWESoft.....	35
6.4 Popis použitých měřících kanálů programu DEWESoft.....	37
6.5 Statické a dynamické měření piezoelektrickým snímačem.....	37
7. Měření tenzometry.....	40
7.1 Odporový tenzometr.....	40

7.2	Měření upraveným tenzometrickým snímačem EP02A.....	42
7.3	Příprava tenzometrů na měření v tepelné komoře.....	44
7.4	Měření zbytkové přítláčné síly brzdových destiček za jízdy.....	47
7.4.1	Kalibrace tenzometrů a měření.....	48
7.4.2	Porovnání odporového a polovodičového tenzometru.....	50
8.	Zhodnocení.....	51
9.	Závěr.....	53
	Seznam použité literatury a softwaru	
	Seznam příloh	

1. Úvod

1.1. Cíl a požadavky na měření

Cílem je navrhnout a realizovat způsob měření svěrné síly na automobilových kotoučových brzdách za provozu vozidla. Toto měření by mělo umožnit sledování silových změn na automobilové kotoučové brzdě a napomoci k lepšímu zmapování silových účinků na brzdu. Diplomová práce představuje několik metod zjišťování sil při použití přímého měření v místě upevnění brzdových destiček, nepřímé měření pomocí senzorů umístěných na třmenech, využívajících deformace třmenu brzdy. Měření byla prováděna nejprve staticky při stání vozidla na místě a také dynamicky při jízdě automobilem. Navrhovanými senzory jsou: piezometrický snímač a tenzometry. Snahou je využít program DEWESoft od firmy Dewetron používaný pro měření v TRW. Preferováno je řešení bez mechanického zásahu do měřeného objektu (brzdy). Měření by mělo umožnit sledování silových změn na kotoučové brzdě.

1.2. Historie podniku TRW Lucas Varity

Společnost TRW Automotive z Jablonce nad Nisou se postupně transformovala z velmi známé firmy Lucas Autobrzd s.r.o.

Bývalý národní podnik Autobrzd Jablonec byl založen v roce 1952. Z výrobního závodu bylo do dnešního dne vyprodukováno velké množství náhradních dílů a příslušenství do nových osobních a nákladních automobilů.

Důležitým mezníkem ve vývoji továrny byl rok 1983, kdy byla zakoupena licence na výrobu kotoučových brzd Colette od společnosti Lucas. Tento rok představoval start úspěšné spolupráce mezi továrnou a největším výrobcem brzdových systémů na světě.

O 10 let později, tedy v roce 1993, se Autobrzd a Lucas spojili a založili novou výrobní firmu známou dodnes, Lucas Autobrzd s.r.o. Toto spojení přineslo razantní rozvoj výroby, kdy se z dodavatele brzdových systémů českým výrobcům automobilů např. Škoda Auto a.s. stala významná výrobní společnost dodávající své výrobky předním světovým producentům osobních automobilů jako jsou Mitsubishi, Volvo, VW,

Renault, GM Opel, Peugeot, BMW, Daimler, Chrysler. V roce 1999 se stala společnost Lucas Autobrzdý členem skupiny TRW, největšího světového výrobce aktivních a pasivních bezpečnostních komponentů pro automobilový průmysl. TRW Automotive působí ve 23 zemích celého světa a jeho produkce ho řadí mezi osm největších dodavatelů automobilového průmyslu na světě.

Stále vyšší poptávka po brzdových systémech z Jablonce nad Nisou vedla společnost k postavení moderního závodu ve Frýdlantu v Čechách, kde soustředila výrobu brzdových kotoučů, brzdových třmenů a dílů řízení.

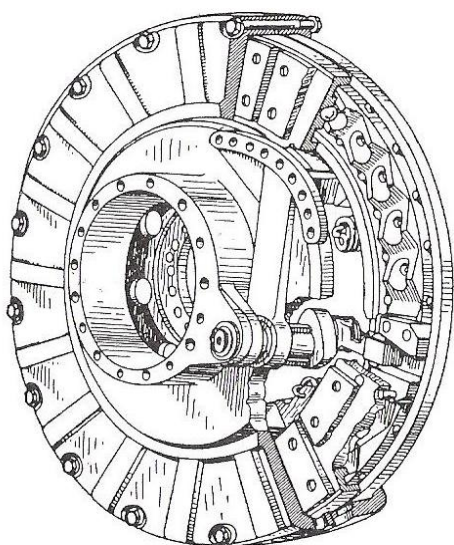
Společnost Lucas Autobrzdý nezůstala jen u výroby kvalitních brzd, ale také se začala zaměřovat na obchodní činnost. V roce 1996 vznikla divize Aftermarket, která se soustředila na vybudování distribuční sítě v českém a slovenském regionu. Za téměř 10 let svého působení byla vytvořena distribuční síť na principu obchodní spolupráce s nezávislými distributory náhradních dílů pro osobní automobily a motocykly. Současně společnost Lucas Autobrzdý zahájila budování servisní sítě, dříve pod značkou Rychloservis Lucas, dnes TRW Autoservice, kde byly aplikovány zkušenosti z výroby do servisní praxe. V současné době tvoří tuto distribuční síť téměř 45 partnerů v Čechách a 5 partnerů na Slovensku. Servisní síť TRW Autoservice poskytuje své služby na 30 místech České a Slovenské republiky.

TRW Automotive se rozhodlo pro spolupráci právě s touto společností. S velkou pravděpodobností se dá říci, že k tomu přispělo také to, že společnost Inter Cars vstoupila na český a slovenský trh a ve velmi krátké době zde vybudovala síť poboček s funkční logistikou. [11]

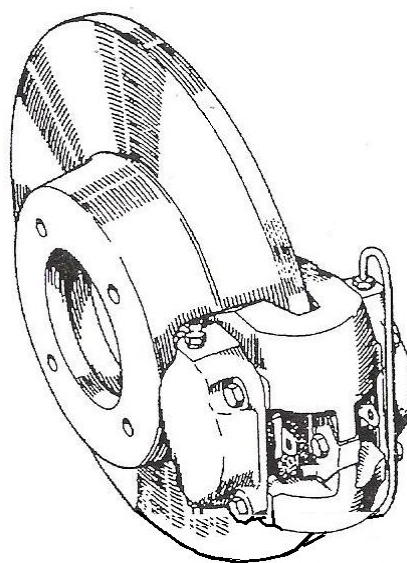
2. Popis konstrukce brzd

2.1 Postupný vývoj kotoučových brzd

Kotoučové brzdy se postupně vyvinuly spolu s dopravními prostředky. Experimenty s kotoučovými brzdami začaly v Anglii v 90. letech 19. století. Vůbec první automobil s kotoučovými brzdami byl patentován Frederickem Williamem Lanchesterem v jeho Birminghamské továrně v roce 1902. Širšího použití se ale dočkaly až po 50 letech 20. století.



Obr.1 Brzda patent r.1940 Klaue



Obr.2 Brzda Dunlop r. 1957

V roce 1953 firma Jaguar na svém závodním D-typu použila kotoučové brzdy v klasickém závodě 24 hodin Le Mans a získala působivá dvě první místa. Velký podíl na vítězství měly kotoučové brzdy vyvinuté Dunlopem s možností účinně brzdit v zatáčkách. Kotoučové brzdy byly do té doby zapomenuty a používaly se pouze sporadicky. Kotoučové brzdy plně pokryté brzdovou destičkou vyvíjela od roku 1930 firma Goodyear v USA pro použití v letadlech, němec Hermann Klaue podal patent na plné brzdové obložení disku s rotujícím kotoučem, kde už byla hlavní myšlenka použita. Chrysler využil na svém vozidle s názvem Crown Imperial plné brzdy typu Ausco-Lambert, které byly založeny na patentu Klaue.

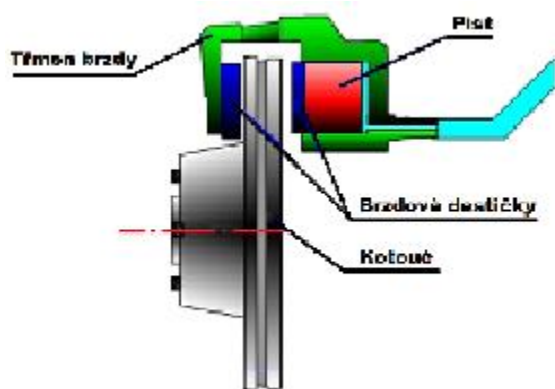
Plné brzdové destičky byly drahé pro produkci a brzdy měly hydraulické problémy s utěsněním a chlazením. Vítězství Jaguáru s kotoučovými brzdami Dunlop v Le Mans a představení na autosalonu IAA ve Frankfurtu v roce 1957 ukázala možnosti této brzdy. Na přední nápravě s koly byly při zkouškách stále zřetelnější

nedostatky bubnové brzdy, problémy s teplotou, zpoždění a ochabnutí způsobené opotřebením. Na tepelně méně namáhaná zadní kola se stále používala bubnová brzda, kotoučová brzda byla výjimkou. Prvními auty se standardní výbavou s kotoučovými brzdami na všech čtyřech kolech byly Fiat Lancia Flavia, Fiat 2300 a také Mercedes Benz 300.

Na začátku sedmdesátých let byly objeveny výhody diagonálního rozdělení brzdového okruhu (vyšší brzdný výkon, menší problémy při poruše brzdového okruhu) opětovné použití bez rizika porušení jízdní stability. Klíčové pro toto uspořádání bylo užití negativního seřízení kol. Díky speciálnímu provedení zavěšení předních kol se změnila brzdící síla tak, že působí proti zpomalení vyvolané vozidlem.

S rozvojem konstrukce brzdy došlo ke zlepšení použitím plavoucího třmene vyrovnávající opotřebení destiček s výrazně zlepšeným tepelným řešením. Negativním seřízením předních kol, se zlepšila stabilita, což je výhoda zejména u malých vozů s menšími koly. [6]

2.2 Popis konstrukce kotoučové brzdy



Přenos brzdící síly na kotoučovou brzdu, je obvykle hydraulický. Sešlápnutím brzdového pedálu, vznikne tlak v brzdovém systému. Brzdová kapalina, začne tlačit na brzdový píst, který tlačí brzdové destičky, kolmo na rotor. Vzniklá třecí síla, mezi rotorem a destičkami, působí proti otáčení.

Obr.3 Princip brzdy

Kotoučová brzda obsahuje tyto hlavní součásti:

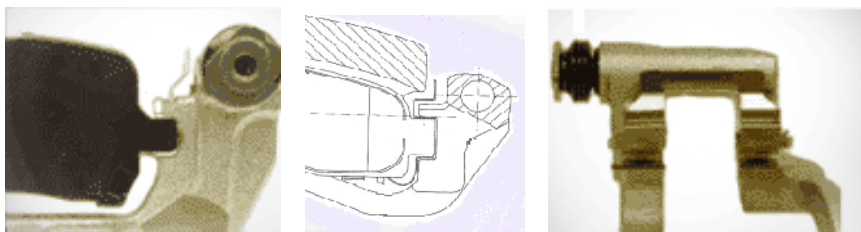
- rotor (kotouč). Ten je ve většině případů kovový, u nejdražších sportovních aut může být i s příměsí keramických částic. V roce 2005 byl za příplatek montován například do některých aut Porsche. Výhodou keramického brzdového kotouče, oproti kovovému, je výrazně nižší hmotnost a také se méně opotřebovává. Brzdový kotouč je připevněn na brzděné kolo. Při brzdění se kinetická energie vozidla mění na teplo a dochází ke značnému zahřívání brzdového kotouče. Proto bývá často (na přední

nápravě bývají obvykle tyto kotouče s vnitřním chlazením a na zadní nápravě (jednoduché) opatřeny uvnitř soustavou kanálků, kterou prochází vzduch, což napomáhá chlazení. V běžném provozu se výjimečně používají také kotouče, do kterých jsou navrtané otvory. To má výhody za deště, kdy otvory pomáhají odvádět vodu (a odpařující se vodní páru) a tím zlepšují brzdný účinek. Brzdové kotouče se provozem postupně opotřebovávají.

- brzdový třmen - je součástka, do které je namontován brzdový píst (bývá obvykle jeden; více jich je u drahých sportovních aut) a suvně připevněné brzdové destičky. Tato součástka je pevně připojena k vozidlu.

- brzdový píst - je součástka zamontovaná do brzdového třmenu. K němu je připojena hadička s brzdovou kapalinou. V případě sešlápnutí brzdového pedálu vznikne v brzdovém systému (v brzdové kapalině) tlak, který přitlačí píst a s ním brzdové destičky k brzdovému kotouči. Dnes se v drtivé většině případů používají samonastavitelné písty, které se samy nastavují tak, aby byla vždy zachována vhodná minimální vůle mezi brzdovým kotoučem a brzdovými destičkami v klidovém stavu.

- brzdové destičky - jsou destičky, přitlačované brzdovými písty. Jsou konstruovány tak, aby při kontaktu s brzdovým kotoučem vznikalo velké tření (tzn. mají vysoký koeficient smykového tření). Během provozu dochází k opotřebovávání těchto destiček. Někdy mívají zabudovaný senzor, který upozorní řidiče na nutnost výměny.

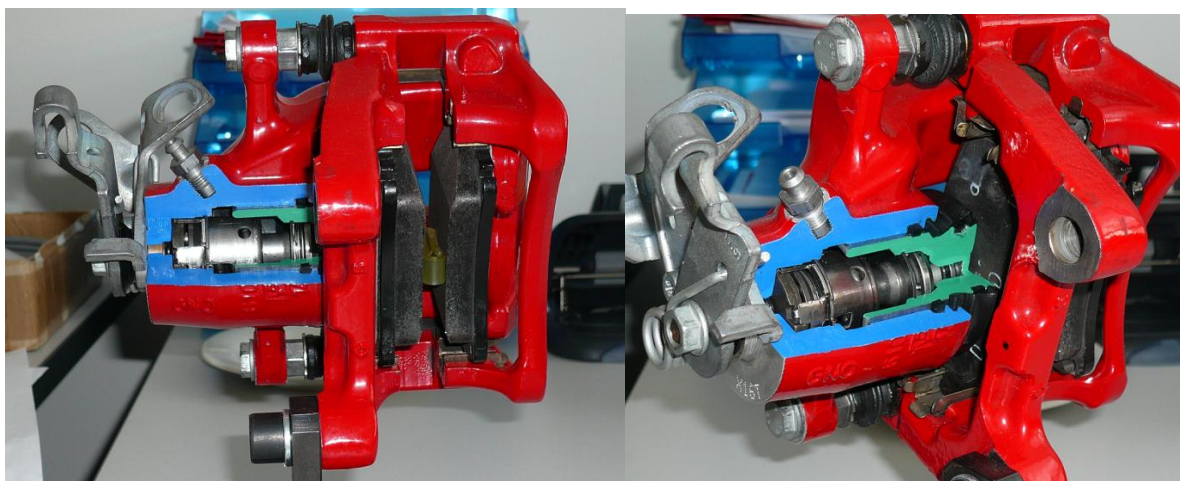


Obr.4 Detail upevnění brzdové destičky

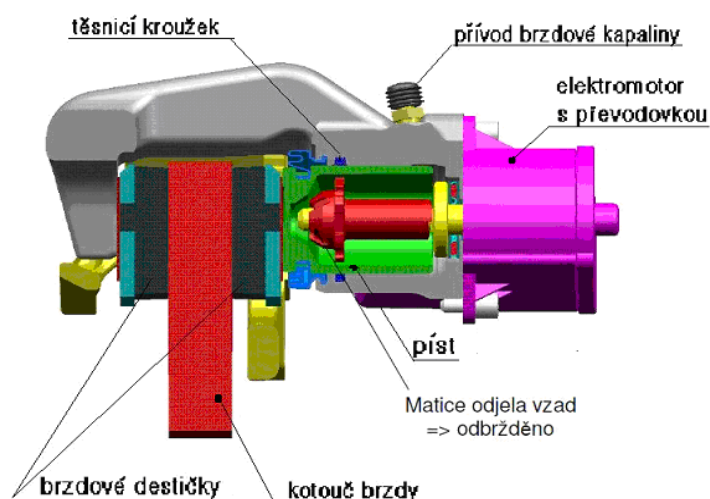
- přitlačná plochá pružina brzdové destičky – snižuje rázy při brždění a klepání brzdových destiček při jízdě

Výhody a nevýhody, oproti bubnovým brzdám.

Kotoučové brzdy jsou oproti bubnovým brzdám výrazně lehčí, výkonnější a lépe se chladí. Na druhou stranu jsou dražší a náchylnější na poruchy, vzniklé znečištěním. Proto se používají u většiny levnějších aut jen na přední nápravě. [1] ,[12] ,[17]




Obr. 5 Skutečnost - zadní kotoučová brzda s ruční parkovací brzdou



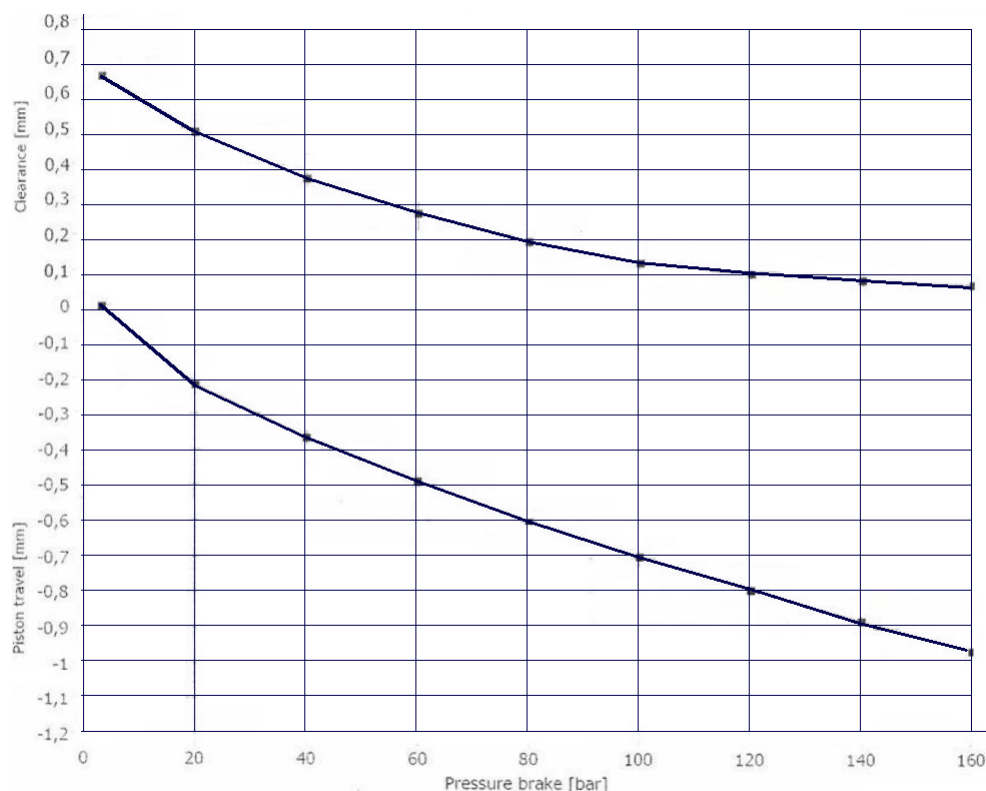
Obr.6 zadní kotoučová brzdy EPB (elektrická parkovací brzda)

Pro účely zjištění pružnosti těsnicího kroužku se provádí test, při kterém se stlačují čelisti kotoučové brzdy vlivem působení hydraulické kapaliny na píst. A porovnává se schopnost těsnicího kroužku navrátit se do původního stavu. Na obr.6 na další stránce vidíme na ose x zvyšující tlak, na ose y je zachycena schopnost těsnicího kroužku odolávat určitému tlakovému zatížení. Při dosažení určitého tlaku např. 20 barů, dochází k povolení kroužku vlivem poklesu tlaku, je nastaven vyšší tlak 40 barů, dojde k povolení kroužku. Horní křivka v diagramu představuje polohu v mm při počátečním působení tlaku. Spodní křivka po povolení těsnicího kroužku. Rozdíl mezi horní a spodní křivkou má vzrůstající tendenci. Při vzrůstajícím tlaku se schopnost kroužku navrátit se do původní polohy snižuje.

	Function Test Rig Clearance front axle brake with pads	Date: 22.3.2011 WP No.: 6836 Evaluation: Single
-----------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------

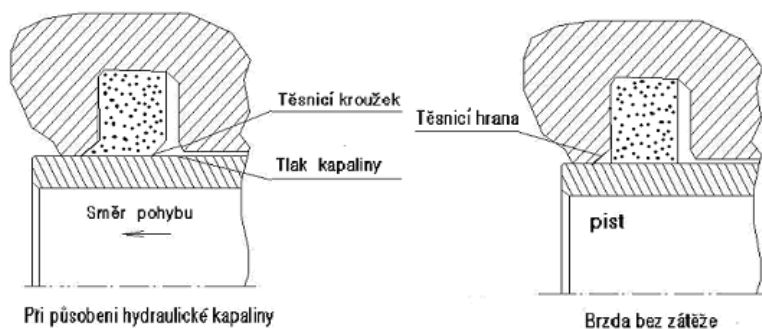
Customer:	VW	Prepressure:	
Brake:	C60-30/13-16" with PWWD	Storage time:	7 days
Drawing no.:	32041973/974	Seal supplier:	Conti
Issue:	C	Type of seal:	Smoothed
Pad material:	Jurid / Honeywell Jurid 310-3	Seal groove:	0,75x37°
Test specification:	TS4-15-106	HB lever:	
Test no.:	T20994_HNE	Direct.of rot.:	right
Assembly fluid:	BCF11	Out spring:	
Brake fluid:	DOT 4	Form of block:	with a rounded rib
Room temperature:	23°C	Suppl. of cast.:	
Tested by:	Cerny Miloslav	Filename:	

Comment:

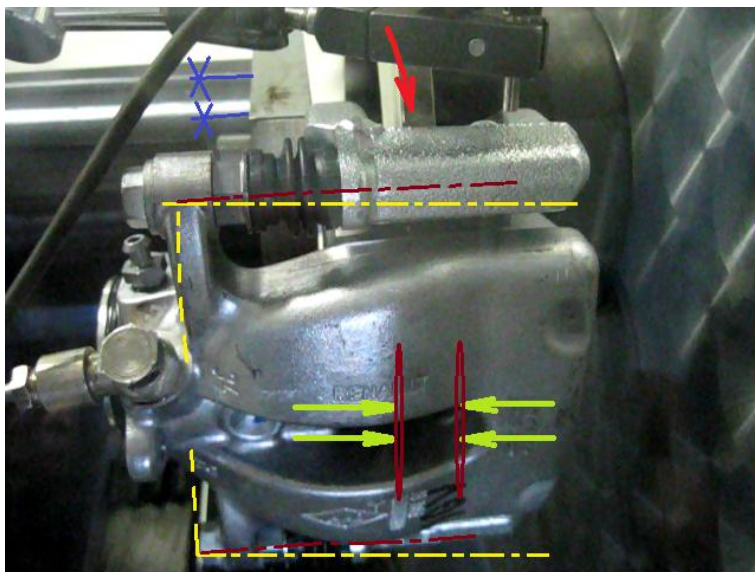


Obr.7 Diagram testu pružnosti kroužku na píst

vysvětlivky: pressure brake (tlak stlačení čelistí brzdy), clearance (odtlačení kroužku)
piston travel (posun píst a povolení, posun těsnicího kroužku)



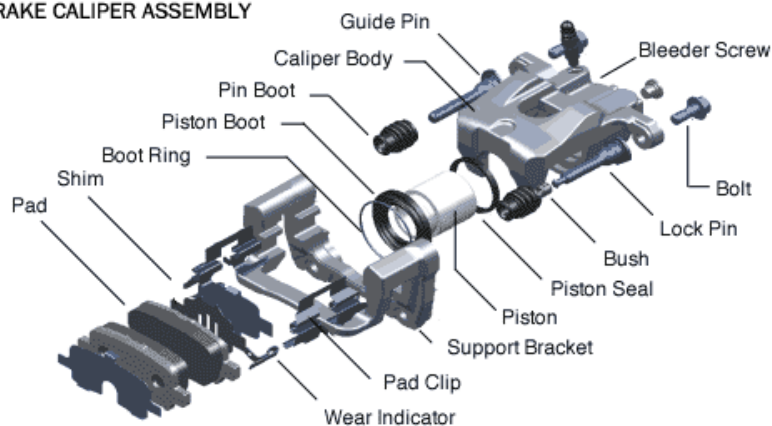
Obr.8 Detail těsnicího kroužku (tzv. Rollback efekt) [6]



Obr.9 Kotoučová brzda na zkušebním stroji

Na zkušebním stroji je v TRW zkoušena dlouhodobá odolnost těsnění umístěném na pístu brzdy. Neustále se otáčející kotouč je svírán kotoučovou brzdou při zvýšeném tlaku na 150 barů. (V provozu při jízdě po silnici lze dosáhnout tlaku na čelisti brzdy asi 50 barů.) Na obr.9 je schématicky znázorněn působící tlak na kotouč. Modrou barvou upevnění brzdy na rám stroje. Červenou šipkou směr otáčejícího kotouče, čerchovaná čára znázorněná hnědou barvou představuje geometrii brzdy před stiskem čelistí. Žlutá čerchovaná barva značí geometrii brzdy po stisku čelistí. Na třmen působí kombinované namáhání tlaku spolu s ohybem. Třmen brzdy je natahován. Dochází k namáhání ohybu vodících tyčí na níž se plovoucí brzda pohybuje. Velikost změny (posunutí) geometrie třmenu je ve skutečnosti malá asi do 1 mm, při tlaku 50 barů se ještě snižuje.

EXPLODED VIEW OF
BRAKE CALIPER ASSEMBLY

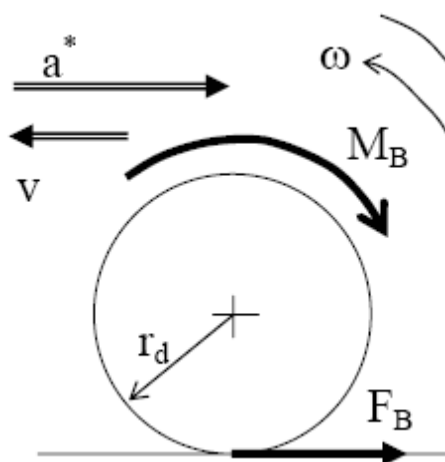


Obr.10 Rozpadové schéma kotoučové brzdy

2.3 Síly vznikající na brzdě

Na kolo při brzdění působí několik sil. Například brzdná síla pneumatiky na vozovku, dynamické účinky. V rovnici rovnováhy vozidla působí mnoho odporů proti pohybu vozidla, odpor valení pneumatiky, aerodynamický odpor, odpor stoupání vozidla.

Na brzdové destičky působí třecí síla, důležitým parametrem je koeficient tření u destiček, parametr třecí citlivosti destiček.



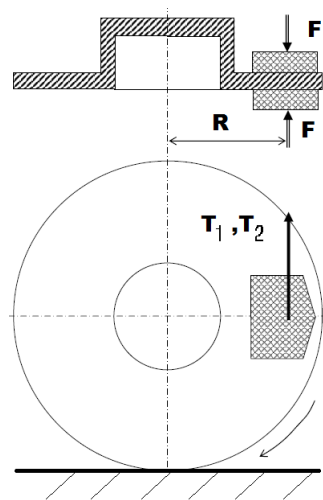
ε Rovnováha na kole :

$$F_B r_d - M_B + I \varepsilon = 0$$

Vnější rovnováha :

$$F_B + O_f + O_V - O_A \pm O_\alpha = 0$$

Obr.11 Působící síly



Vnitřní převod brzdy :

$$c = \frac{\sum T}{F} = 2\mu_0$$

je lineární

Obr.12 Kotouč brzdy

Třecí moment :

$$M_T = (T_1 + T_2) R_S$$

$$M_T = 2\mu_0 F R_S$$

třecí citlivost

$$\frac{dC}{d\mu_0} = 2 = \text{konst.}$$

- nesporná výhoda (stabilita)

[12]

poznámka: jednotlivý význam označení je v seznamu symbolů

3. Měření kapacitním snímačem

3.1 Popis funkce kapacitního snímače při měření tlaku

Základem kapacitního snímače je dvou nebo několika elektrodový systém, jehož parametry se mění v důsledku působení měřené neelektrické veličiny. Uvažujeme-li jednoduchý deskový kondenzátor, bude pro jeho kapacitu C platit

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad (3.1)$$

S - plocha elektrod,

d - vzdálenost elektrod,

ε_0 - permitivita vakua,

ε_r - relativní permitivita.

Z rovnice vyplývá, že změnu kapacity lze způsobit změnou plochy elektrod, vzdáleností elektrod nebo změnou dielektrika (relativní permitivity ε_r).

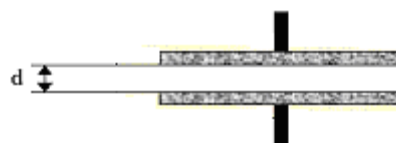
Pro měření tlaku se využívá kapacitního snímače, u něhož dochází ke změně vzdálenosti mezi elektrodami. Jedna elektroda kondenzátoru je pevná a druhá je tvořena membránou, která vlivem působení měřeného tlaku mění svou polohu. Pokud budeme uvažovat, že ve vztahu (3.1) se mění d , ostatní veličiny zahrneme do konstanty k_1 , a potom dostaneme

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{d} = \frac{k_1}{d} \quad (3.2)$$

Z Obr.13. je patrné, že průběh charakteristiky je nelineární. Je zřejmé, že změny kapacity a tím i citlivost budou největší při malých vzdálenostech elektrod d .



Obr. 13. Průběh kapacity



Obr. 14. Kapacitní snímač

Elektrické vyhodnocovací obvody, které převádí změny kapacity na výstupní elektrický signál, bývají doplněny obvody pro potlačení vlivů parazitních kapacit. Ty jsou způsobeny kapacitami kabelu a stínícího krytu. Výměnou za jinou plastovou destičku s rozdílnou tuhostí a tloušťkou lze měnit frekvenční rozsah měření a jeho citlivost. Kapacitní snímače se napájejí střídavým proudem. Změna kapacity se měří buď v můstkovém zapojení nebo s využitím frekvenční modulace. [14]

3.2 Zkušební měření kapacity vyrobeným senzorem



Obr.15 Měření kapacity odporu



Obr.16 Měření stlačení snímače

$$C = \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{t} \quad \dots \text{kapacita} \quad \sigma = \frac{F}{S} \quad \dots \text{napětí} \quad \varepsilon = \frac{\Delta t}{t} \quad \dots \text{prodloužení (stlačení)}$$

$$C + \Delta C = \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{t - \Delta t} = \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{t(1 - \varepsilon)} \quad \text{úpravy vzorce}$$

$$C + \Delta C = \frac{C}{1 - \varepsilon} \quad 1 + \frac{\Delta C}{C} = \frac{C}{1 - \varepsilon} \quad \text{změna tloušťky} = \text{změna kapacity}$$

$$\delta_c = \frac{\Delta C}{C} = \frac{1}{1 - \varepsilon} - 1 = \frac{1 - 1 + \varepsilon}{1 - \varepsilon} = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad \delta_c = \frac{\Delta C}{C}$$

$$\varepsilon = \delta_c(1 - \varepsilon) \quad \varepsilon(1 + \delta_c) = \delta_c \quad \varepsilon = \frac{\delta_c}{1 - \delta_c}$$

Byl použit přístroj s vysokou citlivostí Hewlett Packard 4263B LCR METER schopný měřit v několika pikoFaradech. Pro praktické měření by bylo nutné záznamové zařízení s programem pro zápis naměřené kapacity.

$$\varepsilon_o = 8,84 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} \quad \varepsilon_r = 1,5 \text{ F/m} \quad \varnothing D = 35 \text{ mm} \quad S = \pi \cdot r^2 = 3,14 \cdot 0,01752 = 9,000962 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$C_s = \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{t}$$

dielektrikum je zdvojeno tedy 2S po dosazení

$$C_s = 42,5 \cdot 10^{-12} \text{ pF}$$

$$C_s = 42,5 \cdot 10^{-12} \text{ pF} \quad \text{odpovídá tlaku } 5 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

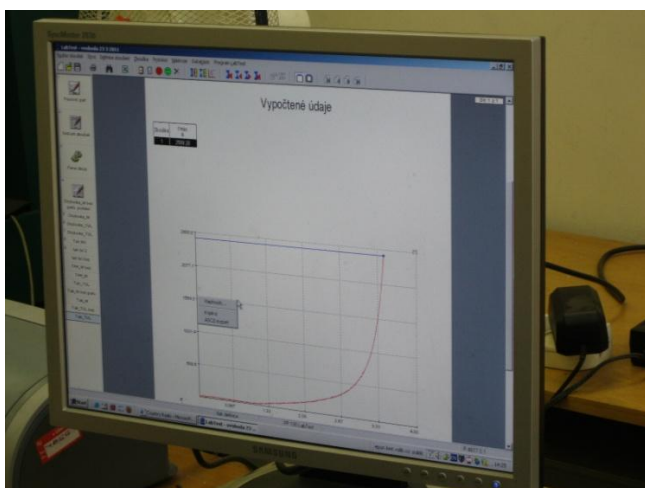
(výpočet zkrácen)



Obr.17 Kapacitní snímač



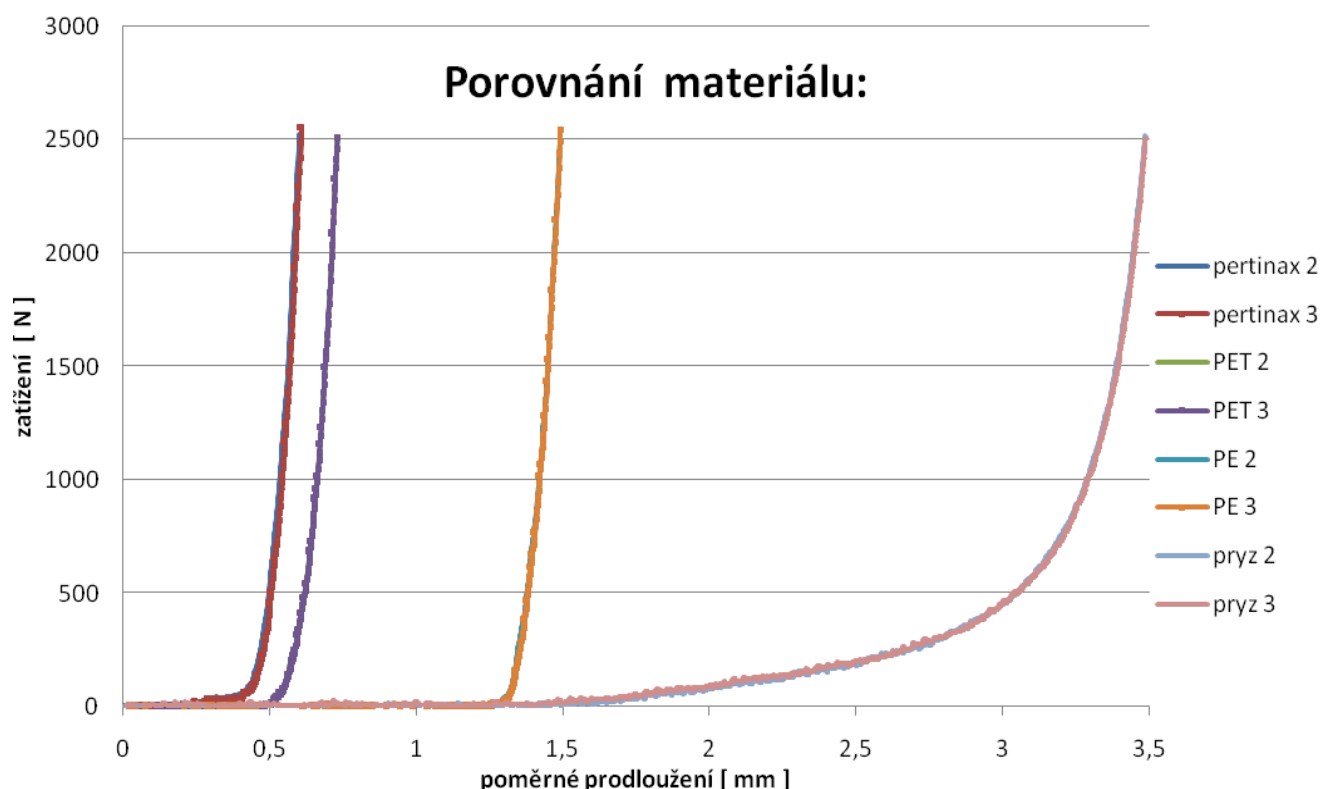
Obr.18 Zkušební zařízení FP 100- Lab Test II



Obr.19 Program Lab test

Na zkušebním zařízení bylo postupně měřeno několik vzorků snímačů, vytvořených z měděného plechu se vzorky různých plastových destiček tvořících dielektrikum. U zkušebního zařízení byl nastaven posuv 15mm /s. Průběh zkoušky probíhal se zatížením destičky od 0 do 2500 N.

Dielektrická konstanta závisí na intenzitě elektrického pole a časovém průběhu této veličiny. Závisí také na teplotě, tlaku, struktuře materiálu. [10], [11]



Obr.20 Diagram porovnávající různé materiály

Poznámka: Do grafu nebylo zaneseno měření pertinax 1, PET1, PE1 a pryže1, protože neodpovídalo skutečnosti. Nesprávným způsobem byly nastaveny parametry.

Z grafu zjišťujeme, že nejmenší poměrné prodloužení má pertinax, dále následuje PET, polyetylen a materiálem s největší pružností je pryž. Z grafu zjistíme velikost poměrného stlačení při daném zatížení. Tuto skutečnost lze použít v opačné úloze, kdy známe velikost prodloužení, které získáme ze změny získané z kapacity.

Pro účely použití pro umístění mezi pístem brzdy a brzdovou destičku se nehodí pertinax z důvodu velké strmosti křivky, vychází malá deformace. Pryžový snímač se nehodí z hlediska tloušťky přesahující 3mm a nižší odolnosti vůči teplotě.

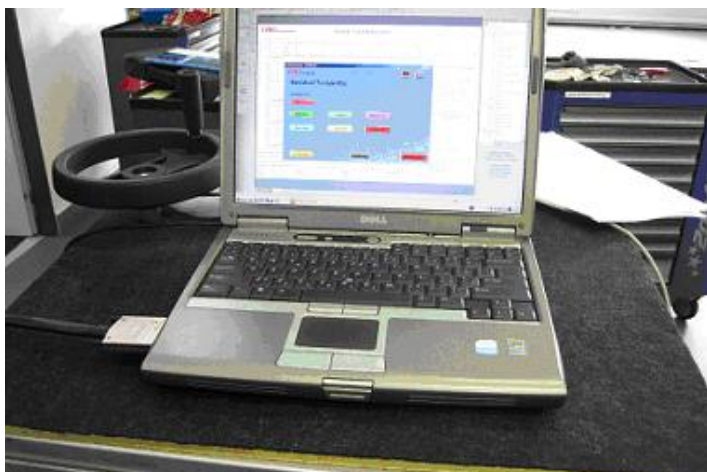
Zhodnocení měření.

Tato metoda je velmi problematická. Je potřeba nalézt vhodný materiál s vhodnou permitivitou a citlivostí, pružností materiálu.

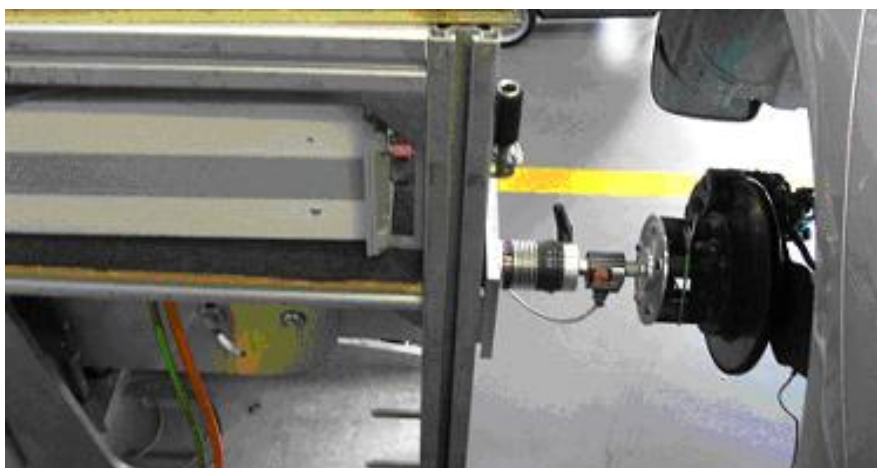
4. Měření zbytkového momentu

4.1 Zkušební přístroj pro měření zbytkového momentu

Rezidual moment nebo také rest moment, český výraz zbytkový moment vzniklý při tření brzdových destiček, při otáčení kotouče dochází k zachycování brzdového kotouče při jednotlivých otáčkách. Nejjednodušší způsob měření je pomocí momentového klíče s číselníkem, což je velmi nepřesné. Pro dokonalejší měření je v TRW využíván přístroj fungující na tomto principu. Elektromotor roztáčí nápravu s brzdou, na které chceme změřit zbytkové napětí. Elektromotor má daný krouťací moment, který je znám. Hřídel elektromotoru na obr.22 je opatřen snímačem krouťacího momentu. Hřídel je opatřena pružinovou spojkou a tvoří pojistný člen při přetížení. Elektromotor pozvolna roztáčí měřenou brzdu. Odpor brzdy je zaznamenáván snímačem krouťacího momentu.

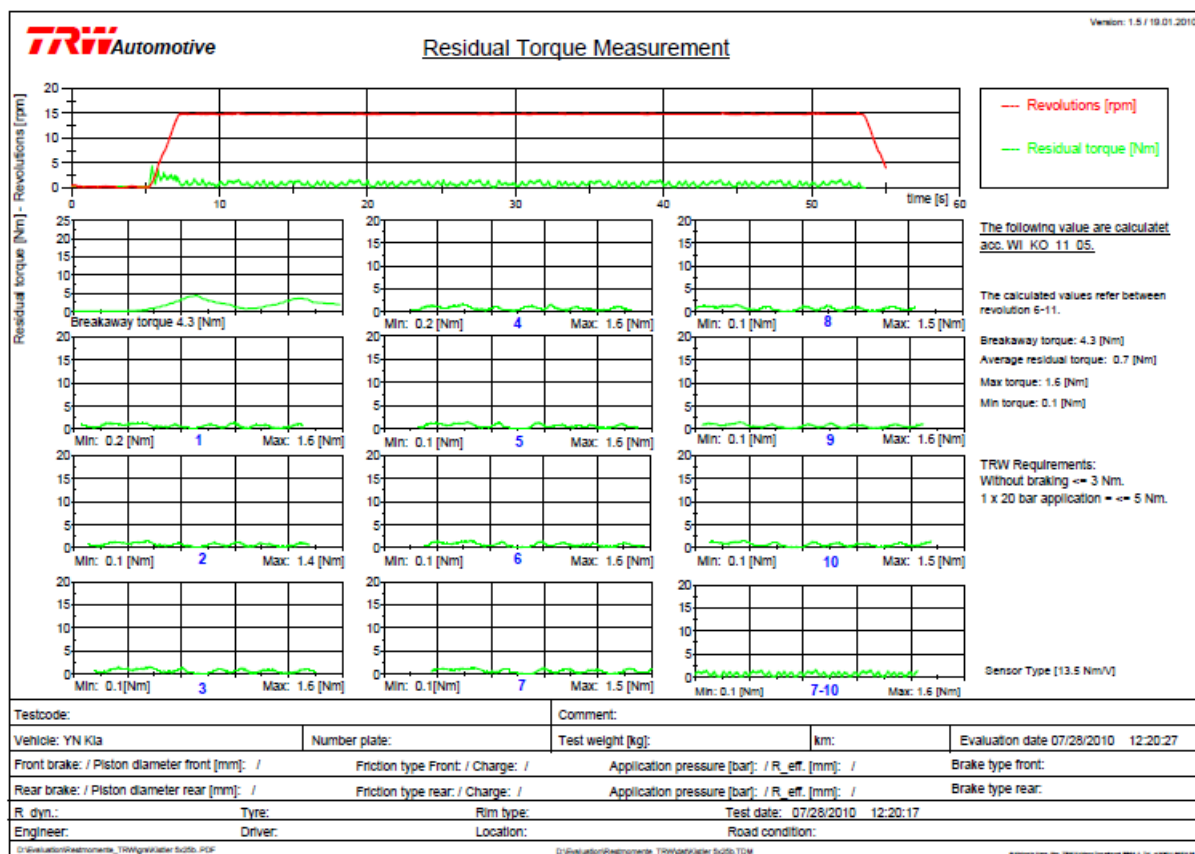


Obr.21 Notebook s programem DIAdem



Obr.22 Zařízení pro měření zbytkového momentu

4.2 Měření zbytkového momentu s programem DIAdem



Obr.23 Graf zbytkového momentu na zadní kotoučové brzdě

V grafu vidíme rozběh (otáčení nápravy s brzdou) křivku označenou červeně, zeleně je označen zbytkový moment.

Postup měření v programu DIAdem jsou zadány parametry poloha brzdy: zadní, přední náprava, strana spolujezdce, strana řidiče. Elektromotor pozvolna roztáčí měřenou nápravu s brzdou 10 otáčky. Každá otáčka je zaznamenána programem DIAdem. Největší maximální moment vzniká při odtržení, při rozběhu kola. Modře označená čísla pod jednotlivými grafy označují jednotlivé otáčky.

Lze získat tyto parametry:

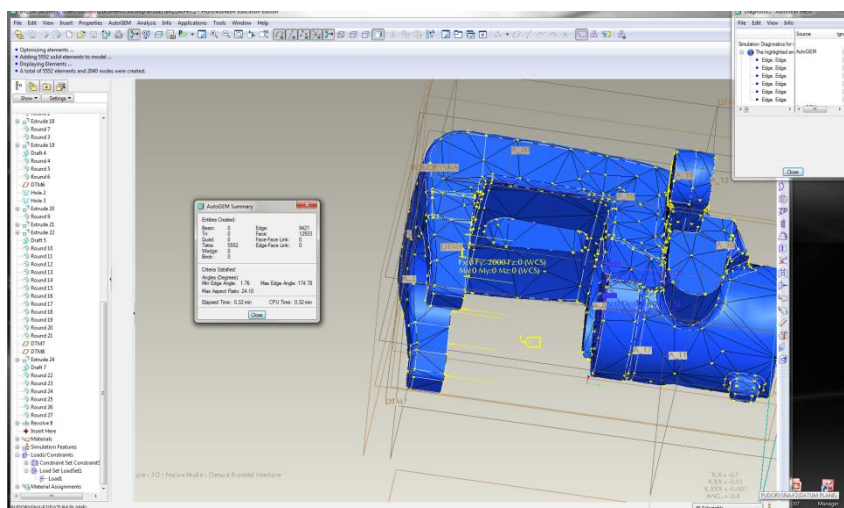
moment při odtržení destiček: 4,3 [Nm] maximální moment: 1,6 [Nm]

průměrný zbytkový moment: 0,7 [Nm] minimální moment: 0,1 [Nm]

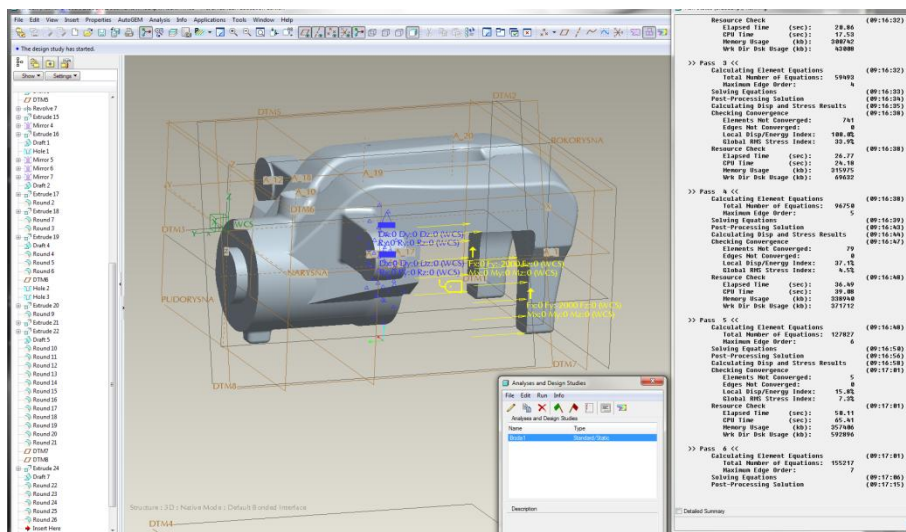
5. Využití metody konečných prvků pro umístění snímače

5.1 Postup a zjištění maximální deformace třmenu

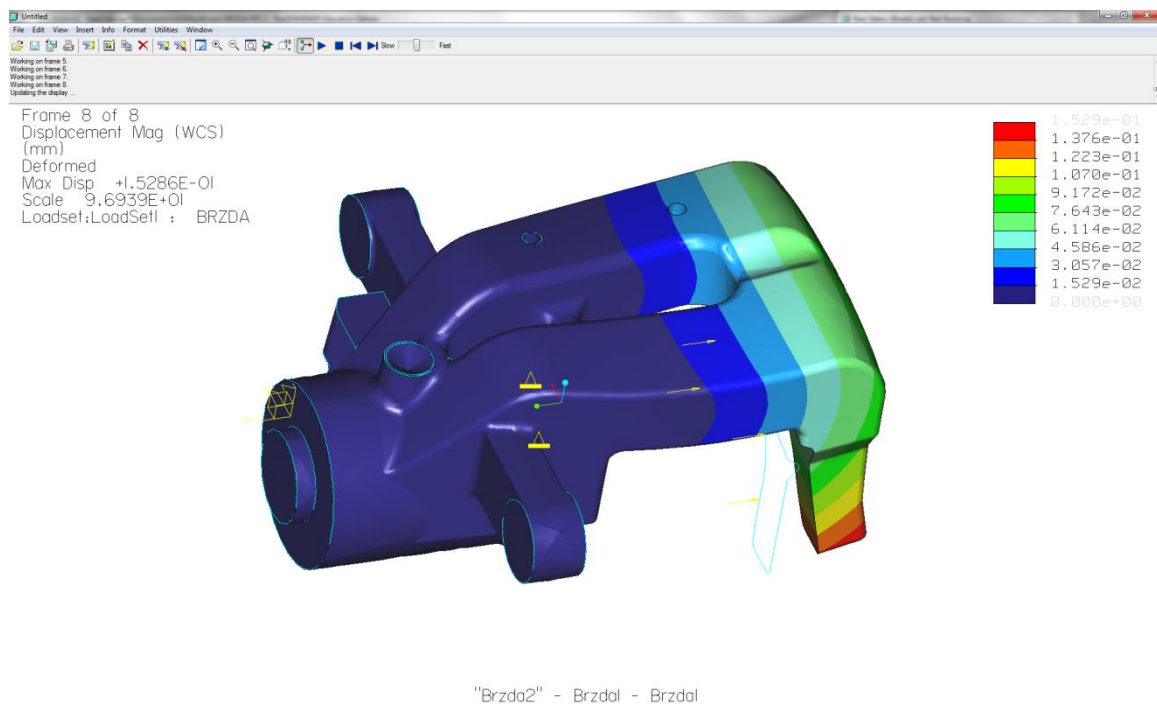
Před samotným měřením je nutné optimálně zvolit místo pro umístění snímače. Proto byl nejprve vymodelován model odlitku třmenu, na kterém budou umístěny snímače. Uvažovaným typem snímače jsou tenzometry různého typu: odporový, polovodičový, fóliový a také snímač fungující na principu piezoelektrického děje. Zajímají nás místa s největší deformací a místo s maximálním prodloužením (posunutím uzlových bodů síťového modelu). Model byl vytvořen v programu Pro/ENGINEER Wildfire 4.0. V nadstavbovém programu Pro/Mechanica byl vytvořen síťový model, materiálem byla zvolena hliníková slitina, byly zadány okrajové podmínky a zatěžující síly v místě předpokládaného umístění brzdových destiček.



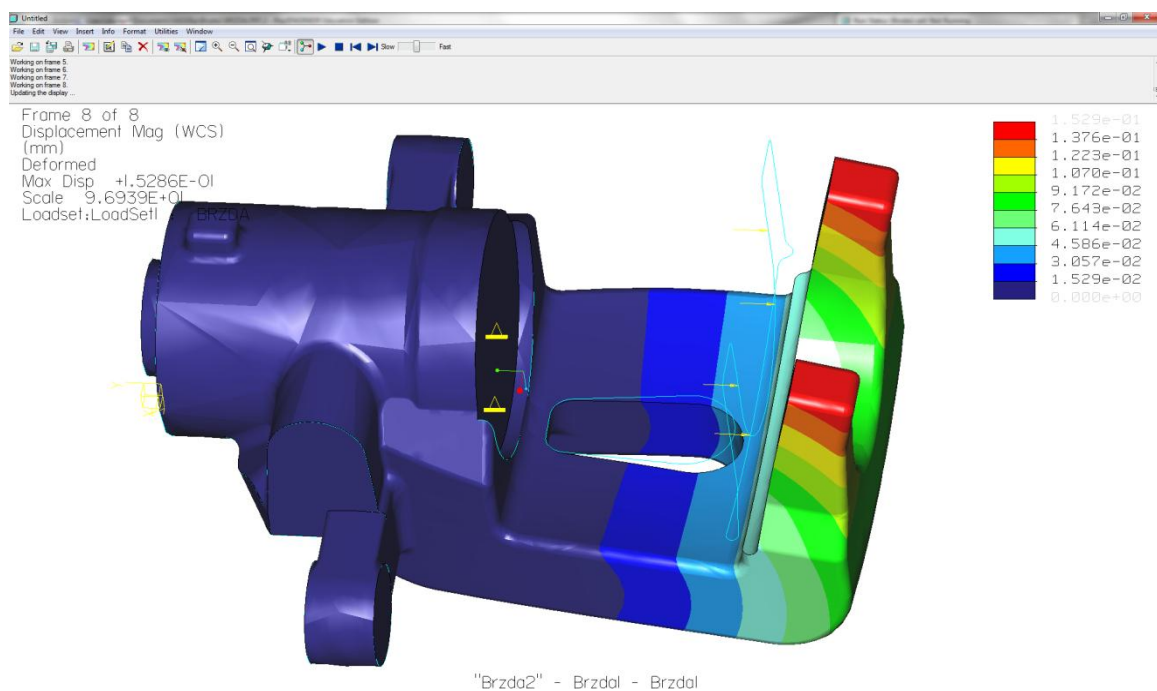
Obr.24 Vytvoření síť modelu třmenu brzdy



Obr.25 Výpočet modelu třmenu brzdy a nastavení okrajových podmínek



Obr.26 Maximální posunutí uzlových bodů u třmenu brzdy

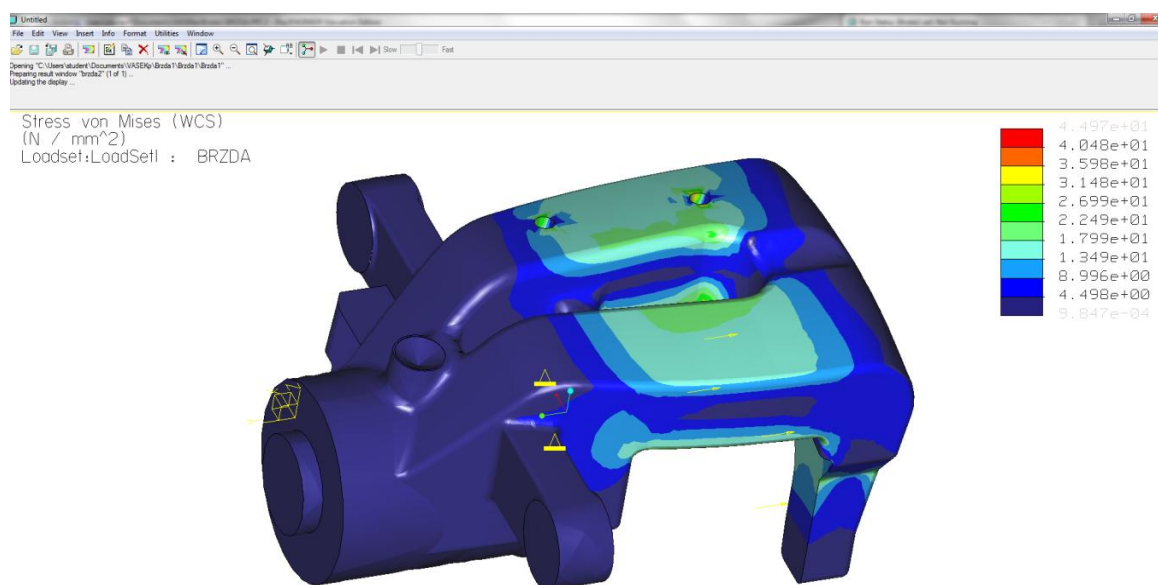


Obr.27 Pohled ze spodní strany brzdy

K maximálnímu posunu uzlových bodů dochází v místě, do kterého je upevněna jedna z brzdových destiček. Pro upevnění tenzometru je potřeba větší plocha k jeho nalepení.

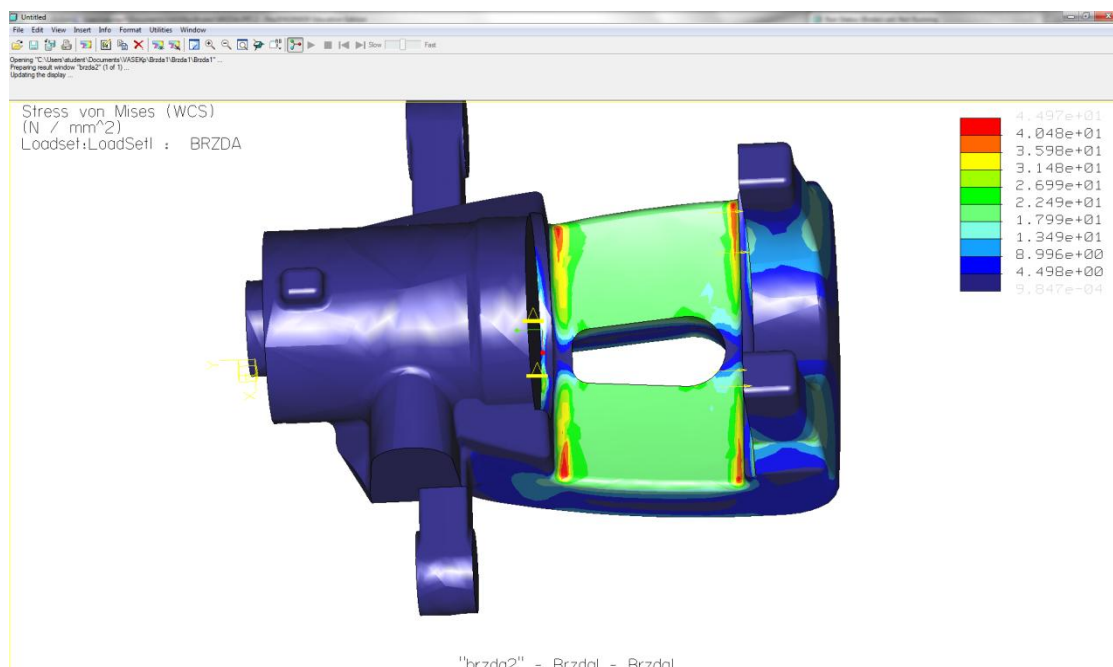
5.2 Zjištění optimální polohy pro snímače

Tenzometr by měl zaujímat určitou plochu musí být dokonale nalepen k podkladové ploše je k němu připojen kabel k vyhodnocovacímu zařízení.



"brzda2" - Brzdal - Brzdal

Obr.28 Deformace zjištěná v třmenu brzdy



"brzda2" - Brzdal - Brzdal

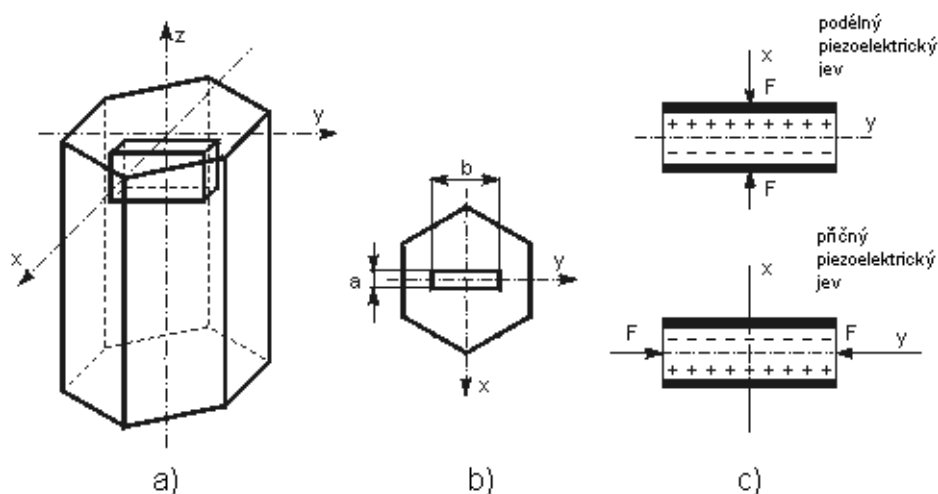
Obr.29 Deformace při pohledu zespodu

Podle grafického výsledku si umíme představit deformaci třmenu, dochází k ohybu třmenu. Optimální místo pro umístění snímače je vrchní plocha brzdy.

6. Použití piezoelektrického snímače tlaku

6.1 Princip piezoelektrického snímače

Je založen na tzv. piezoelektrickém jevu. Při působení mechanických deformací dochází u některých druhů krystalů ke vzniku elektrického náboje, přiložením střídavého elektrického pole se krystal mechanicky rozkmitá. Tyto vlastnosti vykazuje např. křemen, titaničitan barnatý a olovnatý, některé makromolekulární látky a jiné. V praxi se nejčastěji využívá vlastností SiO_2 a BaTiO_3 . Piezoelektrický element tvoří výbrus získaný z krystalu křemene (Obr.30a), jejíž hrany budou rovnoběžné s jednotlivými osami krystalu (X - osa elektrická, Y - osa mechanická, Z - osa optická). Piezoelektrický jev závisí na směru deformace vzhledem k osám krystalu (obr.30b). Působí-li síla kolmo na optickou osu, krystal se zelektrizuje a na plochách kolmých na elektrickou osu se objeví elektrický náboj.



Obr.30 Piezoelektrický snímač: a) Krystal křemene, b) Výbrus snímače

c) Piezoelektrický jev

Působí-li na křemennou destičku rovnoměrně rozložená síla F_x ve směru elektrické osy X (Obr.30c), hovoříme o tzv. *podélném piezoelektrickém jevu* a velikost náboje Q , vznikajícího na každé stěně, kolmé k elektrické ose, bude

$$Q = K_p \cdot F_x \quad (5.1)$$

kde K_p je piezoelektrická konstanta (piezoelektrický modul) (C N^{-1}). Z rovnice (5.1) je vidět, že velikost nábojů vznikajících při působení síly podél elektrické osy X nezávisí na rozměrech krystalového výbrusu.

Působí-li na krystal síla F_y ve směru mechanické osy Y, vznikají náboje opět na plochách kolmých na elektrickou osu, avšak směr polarizačního vektoru je záporný a velikost náboje závisí na geometrických rozměrech krystalu. Hovoříme o tzv. *příčném piezoelektrickém jevu*. Velikost náboje Q je dána vztahem

$$Q = -K_p \cdot F_y \cdot \frac{b}{a} \quad (5.2)$$

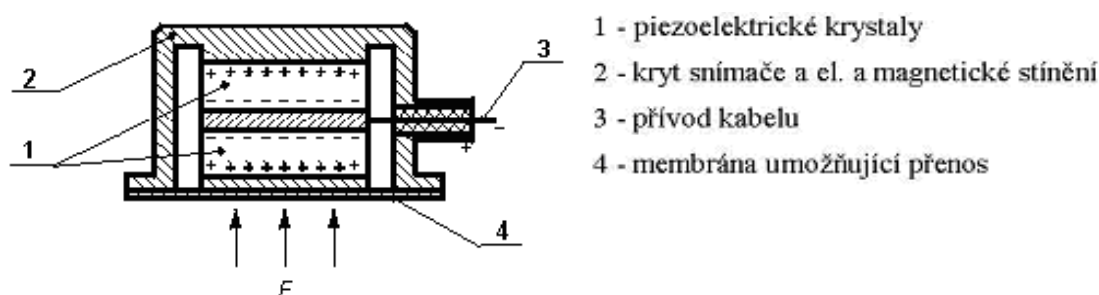
kde b , a jsou rozměry destičky (obr.30b).

Piezoelektrický modul křemene má poměrně malou hodnotu. Jeho předností je ale lineární statická charakteristika, minimální závislost piezoelektrické konstanty na teplotě, velký měřicí rozsah, který je dán mechanickou pevností krystalu a široké teplotní rozmezí (maximálně do 550 °C). Piezoelektrický snímač je vytvořen z krystalového výbrusu, který je opatřen vodivými elektrodami. Při působení neelektrické veličiny se piezoelektrický snímač chová jako generátor náboje. Protože dielektrikum má značný izolační odpor, představuje zdroj napětí s velkým vnitřním odporem. [14]

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{K_p \cdot F_x}{C} \quad (5.3)$$

kde U - výstupní napětí snímače,

C - kapacita čidla včetně přívodů.



Obr.31 Piezoelektrický snímač



Obr.32 Piezoelektrický snímač typu Kistler 9232 A-skutečnost

Výstupní napětí snímače je poměrně vysoké, přesto není možné k měření použít přímo ukazovacího měřicího přístroje. Mezi měřicí přístroj a snímač je nutno zařadit zesilovač s velkým vstupním odporem, jehož hlavním úkolem je impedanční přizpůsobení, méně již vlastní zesílení signálu. Běžně se využívá obvodů realizovaných s tranzistory řízenými elektrickým polem.

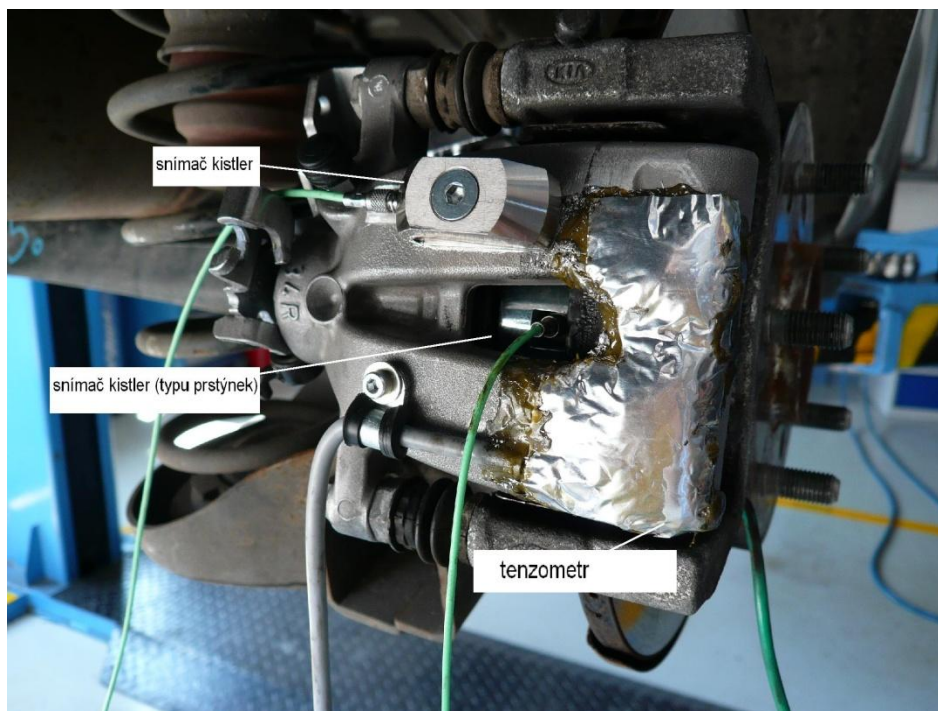
Piezoelektrické snímače se používají především pro měření dynamických tlaků od frekvencí např. 3 až 5 Hz. Generují měřicí signál s chybou kolem 1 %. Je nutno dbát na to, aby hmotnosti částí, které přenášejí sílu na výbrus byly co nejmenší a aby měly také vlastnosti pružiny s lineární charakteristikou. Pokud se snímají průběhy tlaku tekutin s vysokou teplotou, je nezbytné chlazení snímače. Jejich výhodou jsou miniaturní rozměry, jednoduchost a umožňují měřit v nejširším frekvenčním rozsahu, např. do 100 KHz. Používají se zejména k měření tlaku, tlakové síly, zrychlení, výchylky a mechanického napětí. [10]

6.2 Příprava pro kalibraci snímačů

Tenzometr nalepený v TRW Koblenz byl nakalibrován podle piezoelektrického snímače prstýnek. Piezoelektrický snímač Kistler na třmenu je nakalibrován podle snímače typu prstýnek. Pro kalibrování snímačů se ukázalo nejvhodnější zatažení ruční brzdy, z důvodu možnosti udržení stejné síly po téměř neomezenou dobu. Nelze brát až úplně doslovně, síla na zatažené brzdě po desítkách minut nepatrně slábne, oproti tomu na brzdovém pedálu se velmi těžko dá udržet stejná hodnota po dobu několika minut.



Obr.33 Piezoelektrický snímač typu Kistler 9091 A (prstýnek)



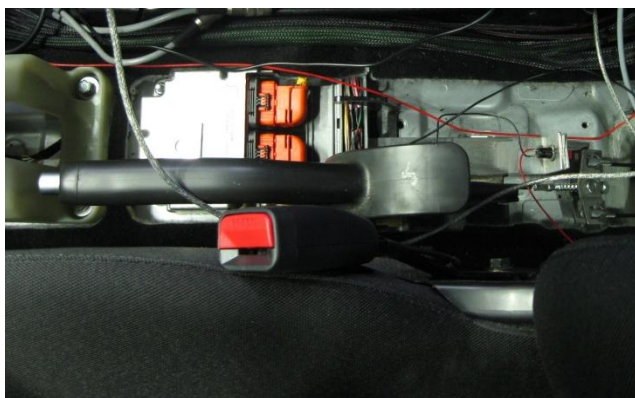
Obr.34 Rozmístění jednotlivých snímačů



Obr. 35 Zesilovače pro piezoelektrické snímače, zařízení umožňující nulovat displej u snímače třmenu, krabičku s relé a zařízení pro zapojení termočlánků (žlutý adapter s kabely k termočlánkům)

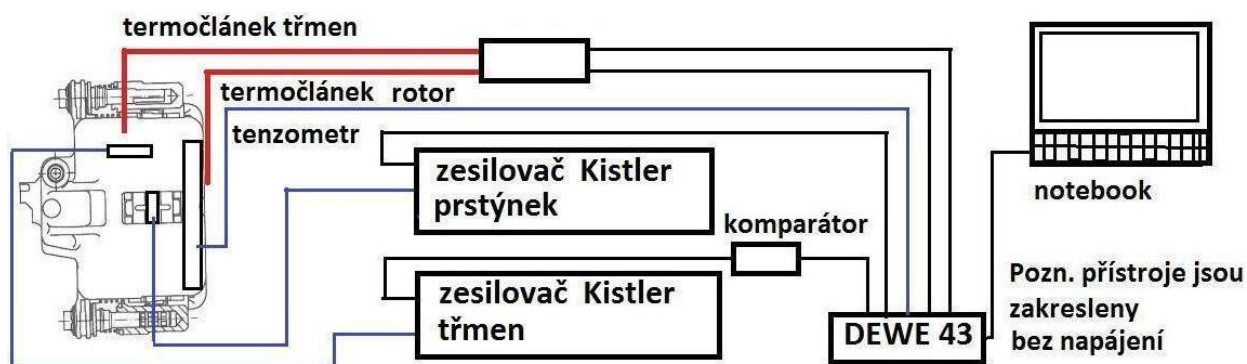


Obr. 36 Postupné zatažení ruční brzdy

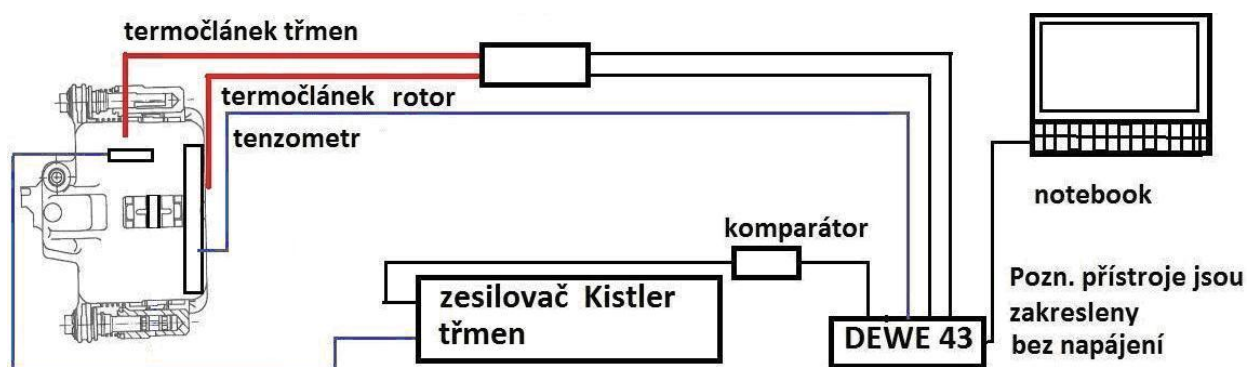


Obr. 37 Spínač pro relé na ruční brzdě - mechanické řešení

Spínač na ruční brzdě byl později nahrazen komparátorem umožňující lepší sepnutí na náběžné hraně signálu.

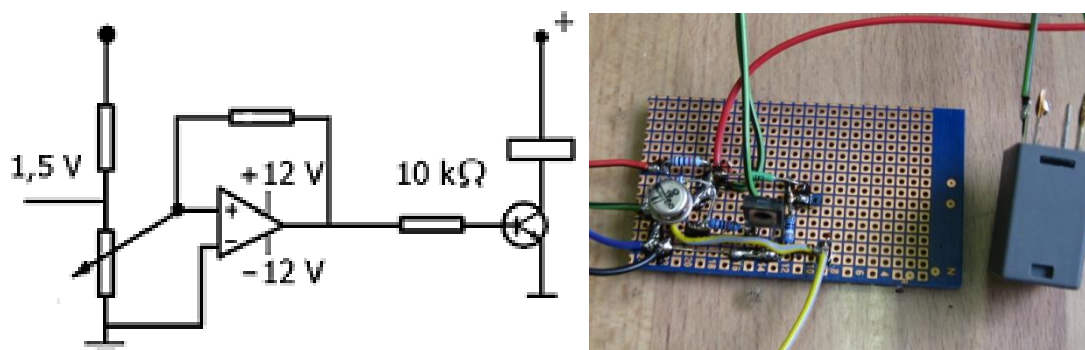


Obr. 38 Schéma zapojení pro statické měření

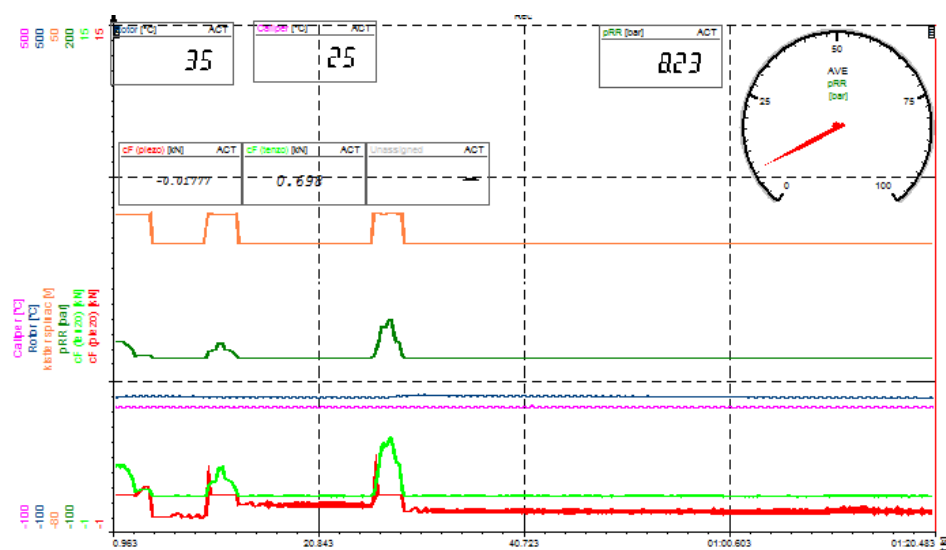


Obr. 39 Schéma zapojení pro dynamické měření za jízdy

Komparátor – zařízení pro dokonalejší sepnutí snímače



Obr.40 Schéma komparátoru a skutečnost



Obr. 41 Graf s jednotlivými průběhy křivek cF(tenzo) zelená, cF(piezo) červená

Komparátor ovlivňuje funkci označenou kistler spínač - oranžová barva

Na náběžných hranách vidíme výchyly u piezometrického snímače. (červená b.)

Snímač tlaku v brzdové kapalině je označen tmavě zelenou barvou jednotky (bary).



Obr. 42 Snímač tlaku v brzdové kapalině a jeho umístění



Obr. 43 Přípravek pro měření teploty z otáčejícího kotouče



Obr. 44 Připojení kanálů do přístroje DEWE 43

SLOT	ZAP/VÝV	C	SPRÁVA	ZESILOVAČ	FYZIKÁLNÍ HODNOTA	UNIT	NASTAVENÍ
0	Zapnut	43V	10 mV/V, Exc 10V	SN: D020135F0	-722.7	-0.01 kW	Nastav k. 0
1	Zapnut	43V	10 mV/V, Exc 10V	SN: D020135F1	-24.85	-0.137 kN	Nastav k. 1
2	Vypnut	43V	10V, 50 kHz	SN: D020135F2	-50	-0.009 V	Nastav k. 2
3	Vypnut	43V	10V, 50 kHz	SN: D020135F3	-50	-0.014 kN	Nastav k. 3
4	Zapnut	43V	10 mV/V, Exc 10V	SN: D020135F4	-5.8	1.864	Nastav k. 4
5	Zapnut	43V	10V, 50 kHz	SN: D020135F5	-104.2	-0.021 kN	Nastav k. 5
6	Vypnut	43V	10V, 50 kHz	SN: D020135F6	-50	0.008 kN	Nastav k. 6
7	Vypnut	43V	10V, 50 kHz	SN: D020135F7	-50	0.499 V	Nastav k. 7

Obr.45 Náhled na připojené kanály

6.3 Použití programu DEWESoft

Program DEWESoft od firmy Dewetron je určen pro měření tlaku, rychlosti, zvuku má poměrně univerzální využití. Program je vytvořen s jasným záměrem, že měřicí technik je od toho aby měřil a předával výsledky ve srozumitelné a přehledné podobě a neměl by se zabývat zdoluhavým programováním konkrétních aplikací. Program obsahuje následující části: konfiguraci celého systému, různé typy zobrazení. Konfigurace systému zahrnuje nastavení sériové komunikace použité pro řízení jednotlivých modulů, nastavení parametrů zabudované multifunkční karty – systém umožňuje použití karet firem National Instruments, Data Translation nebo Microstar – a samotnou konfiguraci reálných modulů. Při použití programovatelných modulů DAQP nebo PAD spočívá konfigurace ve spuštění funkce „Scan modules“ a systém zobrazí skutečné uspořádání. Program je schopen identifikovat až 255 kanálů. Nastavení samotných modulů zahrnuje možnost volby vstupní citlivosti a frekvenčního rozsahu, zápisu názvu kanálu, měřené fyzikální veličiny, kalibrační přepočty a volbu zobrazení střední, efektivní, minimální a maximální hodnoty (platí pro stejnosměrné i střídavé části signálu). Konfigurační část zahrnuje i volbu vzorkovací rychlosti, závislé na použité kartě a aktivaci spouštění záznamu dat při výskytu nastavených příznaků.

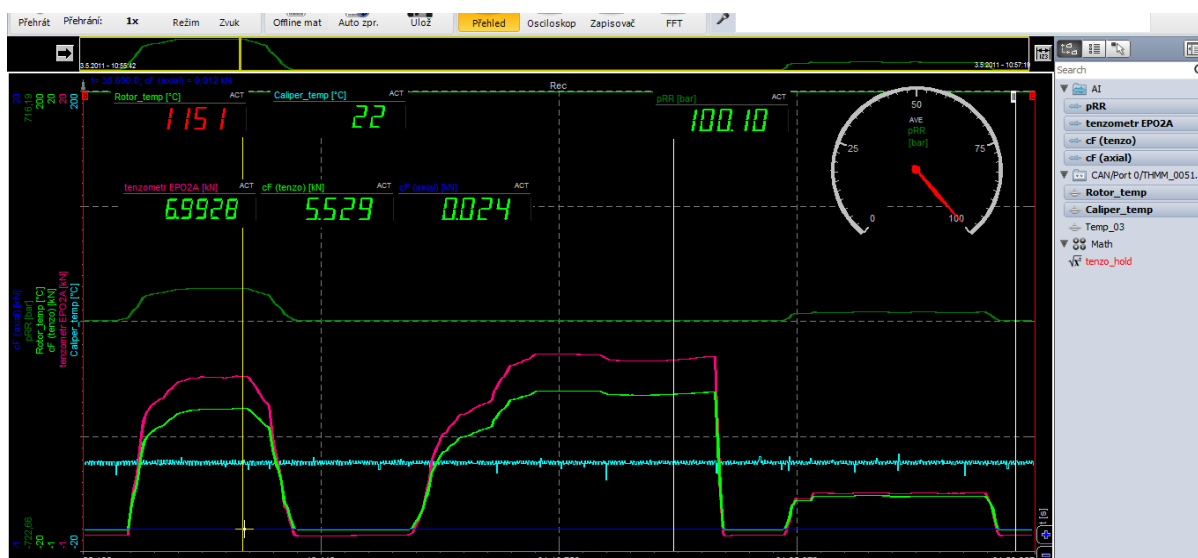
Zobrazení měřených dat lze použít ve formě digitálních ukazatelů, osciloskopické obrazovky a zapisovače v časové oblasti nebo v souřadnicích x-y. Digitální ukazatele lze v případě potřeby rozmístit na pozadí obrazu testovaného technologického celku podle skutečné polohy jednotlivých měřených míst. V případě osciloskopického zobrazení lze na monitoru umístit až čtyři obrazovky, každou se samostatně nastavitelnou časovou osou a s libovolnými kanály. Totéž platí pro obrazovky zapisovače s tím, že na ose x lze volit zobrazení relativního nebo absolutního času. Nezávislost nastavení jednotlivých obrazovek má výhodu v možnosti současného sledování rychlých a pomalých průběhů – typický příklad je monitorování kvality sinusového průběhu síťového napětí a současně kolísání jeho efektivní hodnoty. Zobrazení v souřadnicovém systému x-y umožňuje samozřejmě výběr libovolných kanálů na jednotlivé osy. V této části lze též ukládat měřená data na disk, a to hned několika způsoby. Nejjednodušší je ručně myší stisknutím tlačítek STORE a STOP, nebo podle zadaných podmínek z libovolného vybraného analogového kanálu a konečně externím digitálním signálem. Současně při záznamu dat lze ukládat též značky, jejichž seznam s přiloženým časem, kdy byly generovány,

je k dispozici. Rozeznáváme tři typy značek – stisknutí klávesnice, psaný komentář a mluvený komentář v případě, že systém je vybaven zvukovou kartou. Další skupina funkcí provádí analýzu zaznamenaných dat. K dispozici FFT analýza, výpočet a zobrazení orbitů a funkce frekvenční odezvy. V analyzačním módu lze data exportovat v odpovídajících formátech do dalších programů, např. FlexPro, Ideas-UNV nebo Ideas-ATI, Microsoft Excel případně do textového souboru ASCII.

Export do Excelu se ukázal jako méně šťastný z důvodu velkého množství dat, Excel naměřená data dává do jednotlivých listů. Maximální počet dat je 30 000, pro větší počet dat je vhodnější exportovat data do Matlabu nebo DIAdemu. [13]



Obr.46 Kalibrace snímačů



Obr.47 Náhled při zjištění odchylek snímačů (pozn. horní křivka tlaku pRR posunuta osa y)

6.4 Popis použitých kanálů pro měření

Označení kanálů pro měření:

pRR.....	[bar]	tlak od snímače tlaku hydraulické kapaliny
tenzometr EPO2A....	[kN]	síla naměřená našroubovaným tenzometrem
cF (tenzo).....	[kN]	síla naměřená nalepeným tenzometrem na třmenu
cF (axial).....	[kN]	síla naměřená piezosnímačem typu pstýnek v ose pístku
Rotor_temp.....	[°C]	teplota na rotoru (na brzdovém kotouči)
Caliper_temp.....	[°C]	teplota na třmenu
kistler spínač.....		umožňuje pomocí komparátoru ovlivnit nulování piezosnímače
tenzo_hold,formule.....		pomocný matematický kanál

DEWESoft - Datový soubor: overeni_tenzo_2011_05_03_0002.d7d

Měření Analýza Datové soubory Nastavení Přehled Tisk Export

Kanály Události Hlavička Uzávěrka souboru Math

Obecné informace souboru

Vzorkovací rychlost 5000 s/sec	Datum a čas uložení 3.5.2011 10:55:42	Počet kanálů 9
Redukovaná rychlost 0,2 sec	Trvání 00:01:37	Režim Triggeru rychle při triggeru

Informace kanálů

K. č.	Jméno	Rychlost	Nastavení	Škála	Posuv	Rozsah
AI 0	pRR	5000	43-V (10 mV/V; Exc 10V) SN: D020135F/0	71,94	-3,237	-722,7 .. 716,2 bar
AI 2	tenzometr EPO2A	5000	43-V (10 mV/V; Exc 10V) SN: D020135F/2	-2,229	-3,113	-25,41 .. 19,18 kN
AI 3	cF (tenzo)	5000	43-V (10 mV/V; Exc 10V) SN: D020135F/3	8,673	-2,938	-89,66 .. 83,79 kN
AI 5	cF (axial)	5000	43-V (10 V; 50 kHz) SN: D020135F/5	3,518	-0,008714	-35,19 .. 35,17 kN
CAN Msg 0/#600	THMM_00517_MSG0	10,0		1	0	-5 .. 5 -
CAN 0/#600/0	Rotor_temp	10,0		0,1	0	-100 .. 1372 °C
CAN 0/#600/16	Caliper_temp	10,0		0,1	0	-100 .. 1372 °C
CAN 0/#600/32	Temp_03	10,0		0,1	0	-100 .. 1372 °C
Math 4 (Rovnice)	tenzo_hold	5000	if("tenzometr EPO2A")>0.02 hold("")	1	0	-5 .. 5 -

Obr.48 Nastavení a rozsahy kanálů

6.5 Statické a dynamické měření piezoelektrickým snímačem

Měření statické: piezometrický snímač Kistler 9021 A (prstýnek) a Kistler 9232 A

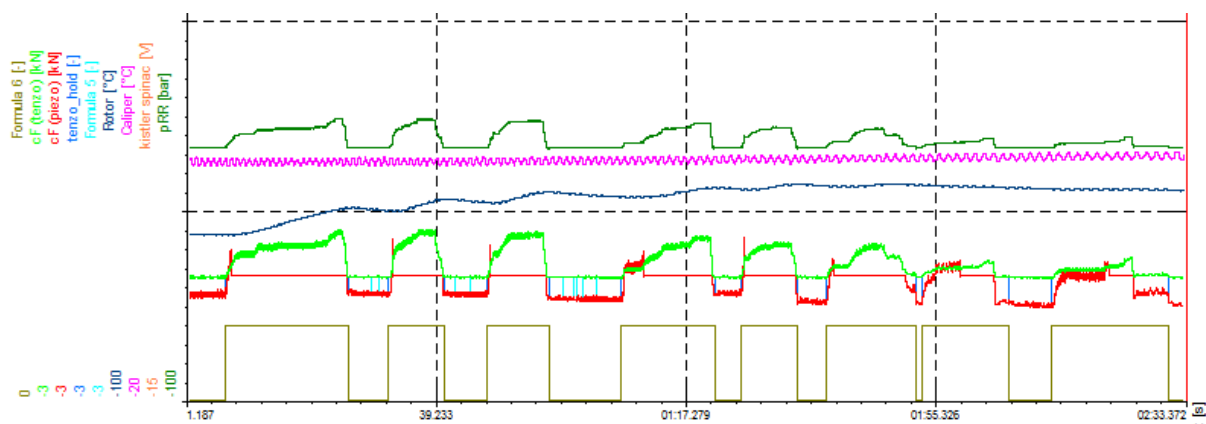
odporový tenzometr, snímač tlaku v brzdové kapalině

Statické měření slouží pro zkalibrování snímače Kistler 9232 A

Měření dynamické (za jízdy):

piezometrický Kistler 9232 A

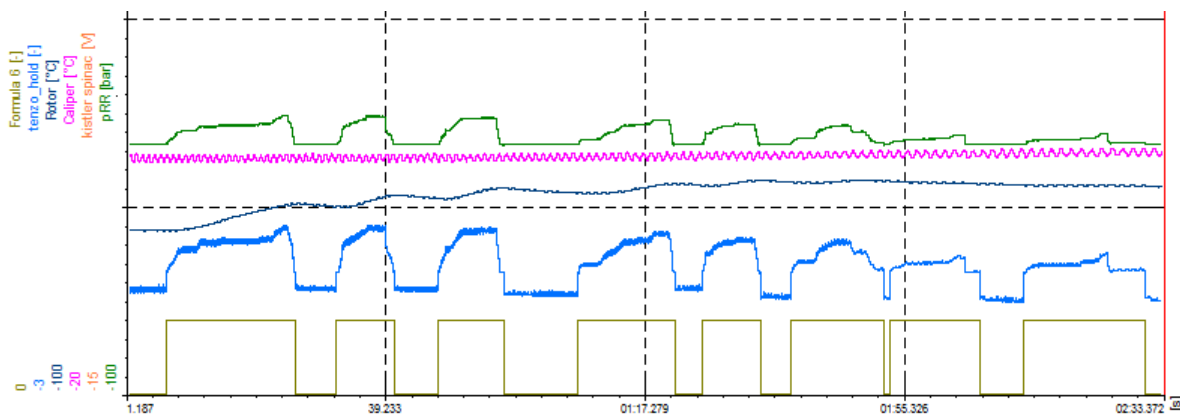
odporový tenzometr, snímač tlaku v brzdové kapalině



Obr.49 Graf s jednotlivými křivkami při dynamickém měření (za jízdy)

Redukovaná rychlost 0,2 sec	Trvání 00:02:31	Režim Triggeru rychle při triggeru		
Informace kanálu				
K. č.	Jméno	Rychlost	Nastavení	Škála
AI 0	pRR	5000	43-V (10 mV/V; Exc 10V) SN: D020135F/0	71,94
AI 2	kistler spinac	5000	43-V (10 V; 50 kHz) SN: D020135F/2	1
AI 3	cF (piezo)	5000	43-V (10 V; 50 kHz) SN: D020135F/3	-0,1882
AI 4	cF (tenzo)	5000	43-V (10 mV/V; Exc 10V) SN: D020135F/4	10,73
CAN Msg 0/#600	THMM_00517_MSG0	0,0		1
CAN 0/#600/0	Rotor_temp	0,0		0,1
CAN 0/#600/16	Caliper_temp	0,0		0,1
CAN 0/#600/32	Temp_03	0,0		0,1
CAN Msg 1/#600	THMM_00518_MSG0	10,1		1
CAN 1/#600/0	Caliper	10,1		0,1
CAN 1/#600/16	Rotor	10,1		0,1
Math 4 (Rovnice)	tenzo_hold	5000	if('kistler spinac')>0.02 hold('cF (tenzo)')	1
Math 5 (Rovnice)	Formula 5	5000	if('kistler spinac'<>0,'cF (piezo)';cF (tenzo)')	1
Math 6 (Rovnice)	Formula 6	5000	if('kistler spinac'>-0.2 and 'kistler spinac'<0.2,0,1)	1

Obr.50 Použité matematické a měřicí kanály



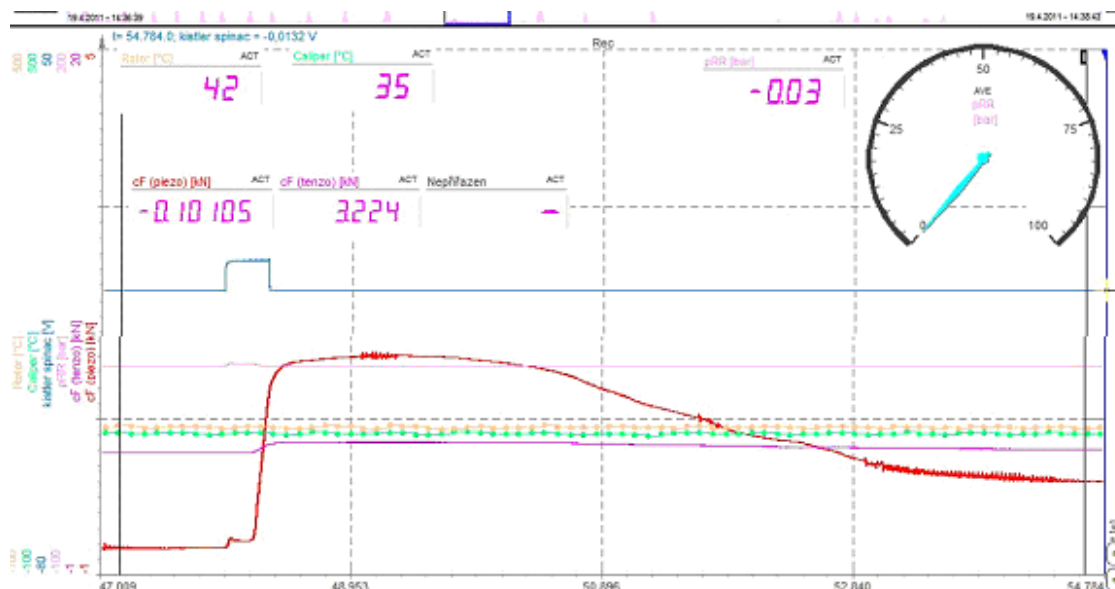
Obr.51 Graf s matematickým kanálem tenzo hold (sv.modrá)

Pozn. grafy upraveny funkce kistler spínač obsažena v f.Formule 6

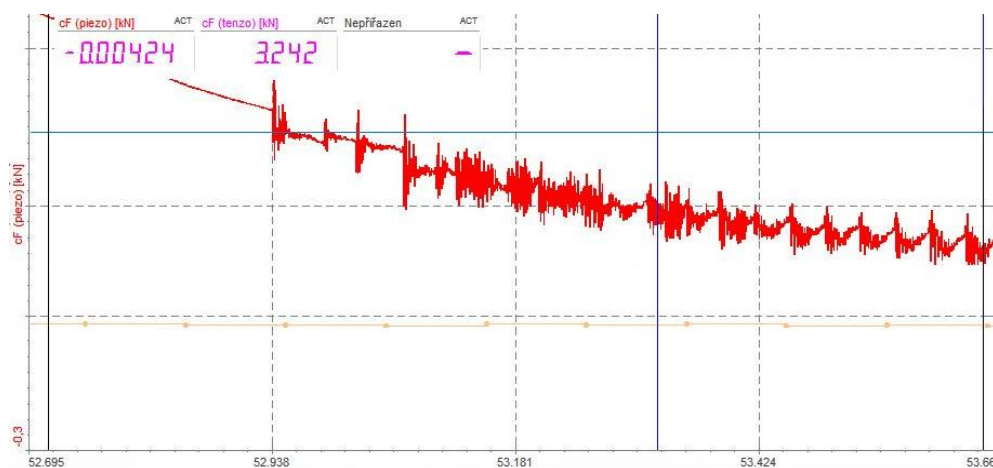
Matematický kanál umožňuje sestavit složenou funkcí z více funkcí. Funkce hold je sestavena z funkcí tenzometrického snímače a piezometrického. Funkce spínač kistler umožňuje sepnutí a vypnutí funkce na náběžné hraně. Oba snímače

fungují na různém rozsahu citlivosti. Proto hodnoty z piezoelektrického snímače jsou v matematickém kanálu použity na menším rozsahu.

Větší citlivost piezoelektrického snímače dokazuje vznik tzv. vrzání při pozvolném brzdění ruční brzdou, při sjezdu z mírného svahu.



Obr.52 Naměřená brzdná síla při pozvolném brzdění „vrzání destiček“ tzv. knarzen



Obr.53 Detail vrzání destiček tzv. „knarzen“

Jak je vidět, na grafu piezoelektrický snímač je natolik citlivý, že je schopen zachytit kmitání vznikající při vrzání destiček, které by bylo možné zachytit pouze mikrofonom. Mikrofon pro tento účel vychází o mnoho dražší než řešení pomocí piezosnímače.

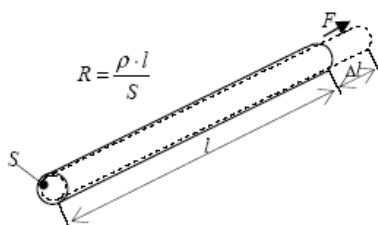
7. Měření tenzometrem

7.1 Odporový tenzometr

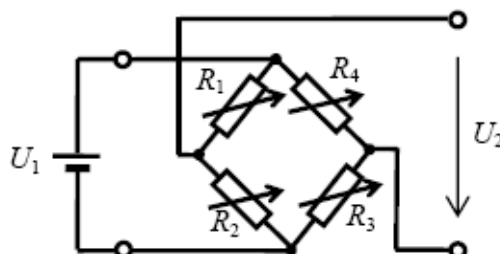
Odporový tenzometr je nejpoužívanějším druhem tenzometru. Slouží k měření sil, případně prodloužení (zkrácení) délky nějaké součásti. Využívá změny elektrického odporu vodiče při jeho mechanickém namáhání. Při namáhání vodiče v tahu dojde k jeho natažení o určitou délku Δl a zároveň se mírně zmenší průřez. To způsobí změnu odporu. Relativní změna odporu je u kovových odporových tenzometrů přímo úměrná relativnímu prodloužení:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta l}{l} = k \cdot \varepsilon.$$

Kde k je charakteristický koeficient tenzometru, pro kovové tenzometry je přibližně 2.



Obr.54 Změna odporu při tahu



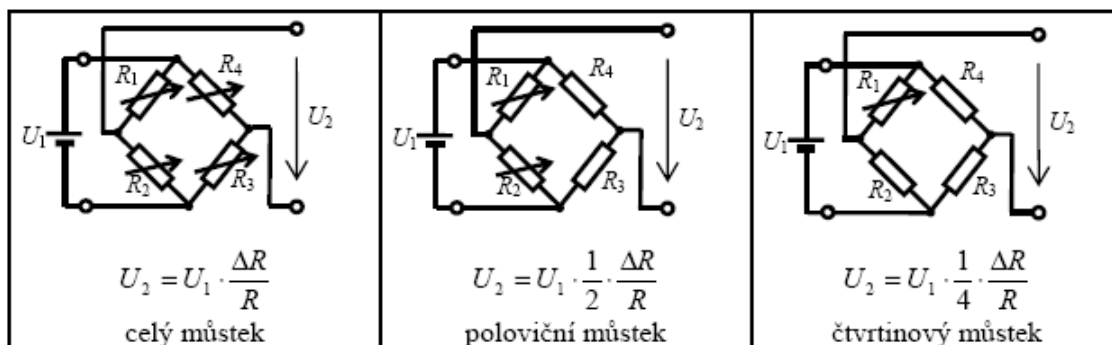
Obr.55 Wheatstonův můstek

Změna odporu tenzometru je velmi malá, běžným ohmmetrem neměřitelná, k jejímu vyhodnocení se proto používá můstkového zapojení. V můstkovém zapojení nevyhodnocujeme celkovou (absolutní) hodnotu odporu, ale pouze její změnu. Existuje několik zapojení můstků, nejjednodušší a nejčastější je tzv. Wheatstonův můstek. Pokud budou všechny odpory stejně velké a všechny se budou moci maličko měnit, (malá změna, řádově do 1 %), pak bude pro výstupní napětí můstku platit:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (7.1)$$

Ideální je, aby se všechny odpory v můstku měnily působením měřené veličiny, a to tak, aby se R_1 a R_3 měnily jedním směrem (např. rostly) a R_2 a R_4 opačným směrem (klesaly). Pak je citlivost můstku největší. To je ale možné pouze u některých aplikací, např. při snímání síly ohýbající nosník pomocí tenzometrů (horní se natahují, dolní stlačují). Při měření jiných veličin, např. teploty, to není možné (odpor se změnou teploty pouze roste).

Pokud jsou všechny odpory v můstku ovlivňovány měřenou veličinou, jedná se o tzv. plný (celý) můstek, pokud jsou měřenou veličinou ovlivňovány pouze dva odpory, jde o poloviční můstek, pokud pouze jeden, jde o čtvrtinový můstek. Zbylé odpory v můstku pak mohou být obyčejné rezistory se stejnou ohmickou hodnotou (levnější, jednodušší), nebo stejná odporová čidla, s jakými se měří, ale neovlivňovaná měřenou veličinou. Pokud jsou všechny odpory v můstku ovlivňovány měřenou veličinou stejně, platí pro různá zapojení můstku následující vztahy:



Obr.56 Typy Wheatstonův můstku

Pokud známe závislost mezi odporem čidla a neelektrickou veličinou, můžeme z výstupního napětí můstku vypočítat velikost neelektrické veličiny. Nejdokonalejší je plný můstek umožňující úplnou kompenzaci nežádoucích vlivů. [8], [10]



Obr.57 Zadní kotoučová brzda opatřená nalepeným tenzometrem

7.2 Měření upraveným tenzometrem snímačem typ EP02A

Pro navrhované řešení měření deformace jsem našel vhodnější tenzometr, který není nutné lepit a odmašťovat povrch odlitku třmenu. Zvolený tenzometr byl upevněn dvěma šrouby do odlitku třmenu. Jedná se o tenzometr uzpůsobený na snímání tahu-tlaku.

Průtahoměr je elektromechanický převodník určený ke snímání velikostí tahových či tlakových, statických i dynamických deformací, vznikajících ve strojních částech působením sil. Na měřené části je průtahoměr upevněn dvěma šrouby. Snímač slouží k měření deformace těla snímače, která se přenáší na deformační člen osazený křemíkovými odporovými tenzometry, převádějícími deformaci na elektrický signál.

Křemíkové tenzometry mají deformační citlivost 60x vyšší, než odporové tenzometry foliové či drátkové, což umožňuje dimenzovat měřicí člen se značnou rezervou pevnosti. Pevnostní rezerva měřicího členu, spolu s vysokou odolností křemíkových tenzometrů vůči dynamickému namáhání poskytují životnost měřicího systému vyšší než 10^7 cyklů jmenovitého zatížení. Vynikající stabilita charakteristik křemíkových tenzometrů a speciální tepelné zpracování deformačního členu zaručují dlouhodobou stabilitu metrologických parametrů.

Deformační člen snímače hmotnosti je uspořádán jako snímač tvaru "brýle", s měřicí částí upravenou tak, aby jmenovitou hodnotu zatížení snímače převedla na poměrnou deformaci. Na měřicí části jsou nalepeny čtyři křemíkové odporové tenzometry typu AP125-6-12, zapojené do Wheatstoneova můstku. Životnost křemíkových tenzometrů při zatěžování jmenovitým zatížením je vyšší než 10^8 cyklů jmenovitého zatížení. Měřicí systém snímače neobsahuje žádné pohyblivé části, které by podléhaly opotřebení. Deformační člen snímače je vyroben z vytvrzené hliníkové slitiny typu AlCu4Mg1 tepelně zpracované na vysokou mez pružnosti, vysokou rozměrovou stabilitu a dostatečnou houževnatost. Jeho povrch je chráněn galvanicky vyloučeným povlakem tvrdého niklu. Tenzometrický systém snímače je umístěn v dutinách v tělese snímače a před klimatickými a mechanickými vlivy ho chrání vrstva pružného plastu, vyplňující dutiny až do úrovně povrchu snímače. Vnitřní okruh snímače obsahuje odpory pro kompenzaci vlivu teploty, pro nastavení hodnot výstupního signálu nezatíženého i zatíženého snímače a je zapojen s ohledem na napájení konstantním proudem. Jedna diagonála můstku slouží k napájení snímače

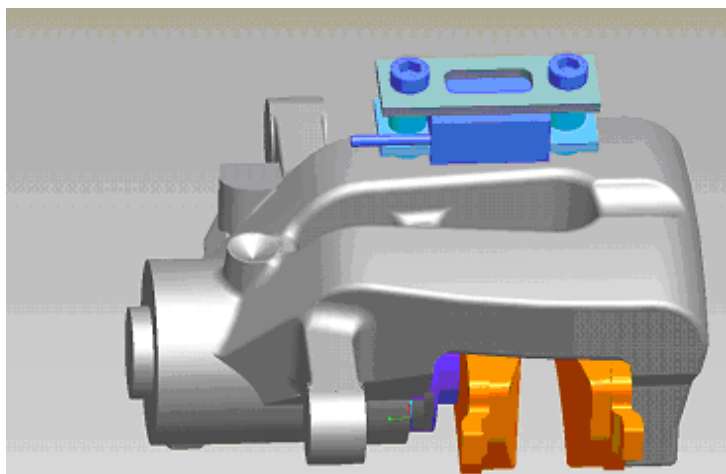
konstantním proudem velikosti do 20 mA, který vylučuje přechodové odpory v připojení snímače k vyhodnocovacímu zařízení a zajišťuje lineárnější kalibrační závislost snímače, než napájení konstantním napětím. Druhou diagonálou vystupuje z můstku napěťový signál, přímo úměrný hmotnosti působící na deformační člen a velikosti napájecího proudu.

Při volbě typu napájení zdroje je třeba vzít v úvahu, že případná nepřesnost vstupní proudu (napětí) způsobí procenticky stejnou nepřesnost výstupního signálu.

TECHNICKÉ PARAMETRY

Jmenovitý rozsah	$\mu\text{m/m}$ 500
Výstupní signál nezatíženého snímače při napájení	$i_{\text{nap}}=10\text{mA}$
Sloučená chyba (hystereze + nelinearita) - v %	% +0.5
Bezpečná přetížitelnost % 200	
Dlouhodobá stabilita (v % jmenovitého rozsahu snímače)	% <+0.1%
Teplotní závislost výstupního signálu nezatíženého snímače (po namontování na konstrukci se uplatní navíc rozdíl teplotních roztažností snímače a konstrukce)	%/°C <0.01
Teplotní závislost výstupního signálu zatíženého snímače (po namontování na konstrukci se uplatní navíc rozdíl teplotních roztažností snímače a konstrukce)	%/°C <0.03
Rozsah pracovních teplot	-10 až +60°C
Napájecí proud	max. 10mA
Životnost vyjádřená počtem cyklů jmenovitého zatížení	$> 10^8$
Životnost vyjádřená počtem cyklů bezpečného přetížení	$> 10^7$

Pozn: firmou VST byl dodán tenzometr s označením na štítku EPO 2A s technickým popisem parametrů pro typ E002/A2 podrobněji v příloze



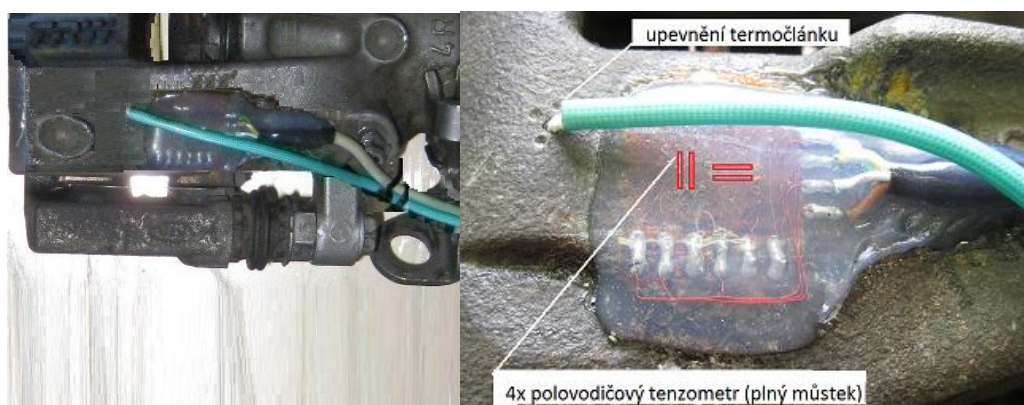
Obr.58 Našroubovaný tenzometr EPO 2A

7.3 Příprava tenzometrů na měření v tepelné komoře

Měření v tepelné komoře má za cíl zjistit tepelnou závislost snímače na teplotě. Pro měření prováděna v tepelné komoře firmy Votsch byly porovnány tyto typy:

- odporový tenzometr (na snímku zakryt hliníkovou fólií)
- s nalepeným polovodičovým tenzometrem VTS Zlín
- našroubovaný tenzometrem EPO 2A

Příprava tenzometrů pro zkoušky do tepelné komory.



Obr.59 Nalepený polovodičový tenzometr VTS Zlín zapojen v úplném můstku

Detail s rozmístěním tenzometrů (velikost tenzometru 3mm)



Obr.60 Našroubovaný tenzometr EPO 2A a odporový tenzometr

Příprava brzdy s nalepeným polovodičovým tenzometrem VTS Zlín. Mezi pístek a čelist třmenu jsme umístili destičku se snímačem tvaru prstýnku, který je zapojen do přístroje Kistler. Přístroj Kistler je propojen přes DEWE 43 do notebooku

s programem DEWEsoft. Brzda je zatažena určitou svěrnou silou, podle údaje na přístroji Kistler je nakalibrován na stejnou sílu s údaji na obrazovce.

Druhá brzda je opatřena našroubovaným tenzometrem EPO 2A, který je také nakalibrován pomocí destičky se snímačem ve tvaru prstýnku. Odchyšky tenzometrů dosahují hodnoty 0,1 kN.

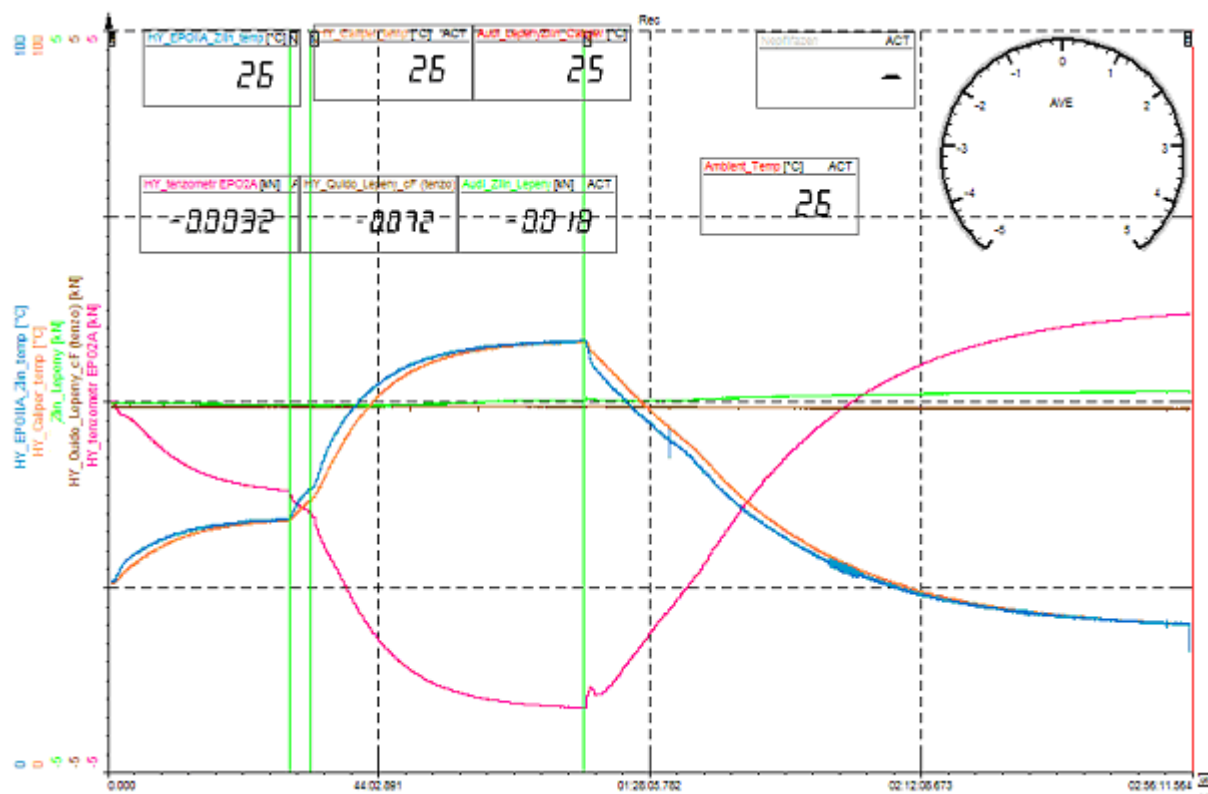


Obr.61 Brzdy v tepelné komoře firmy Votsch

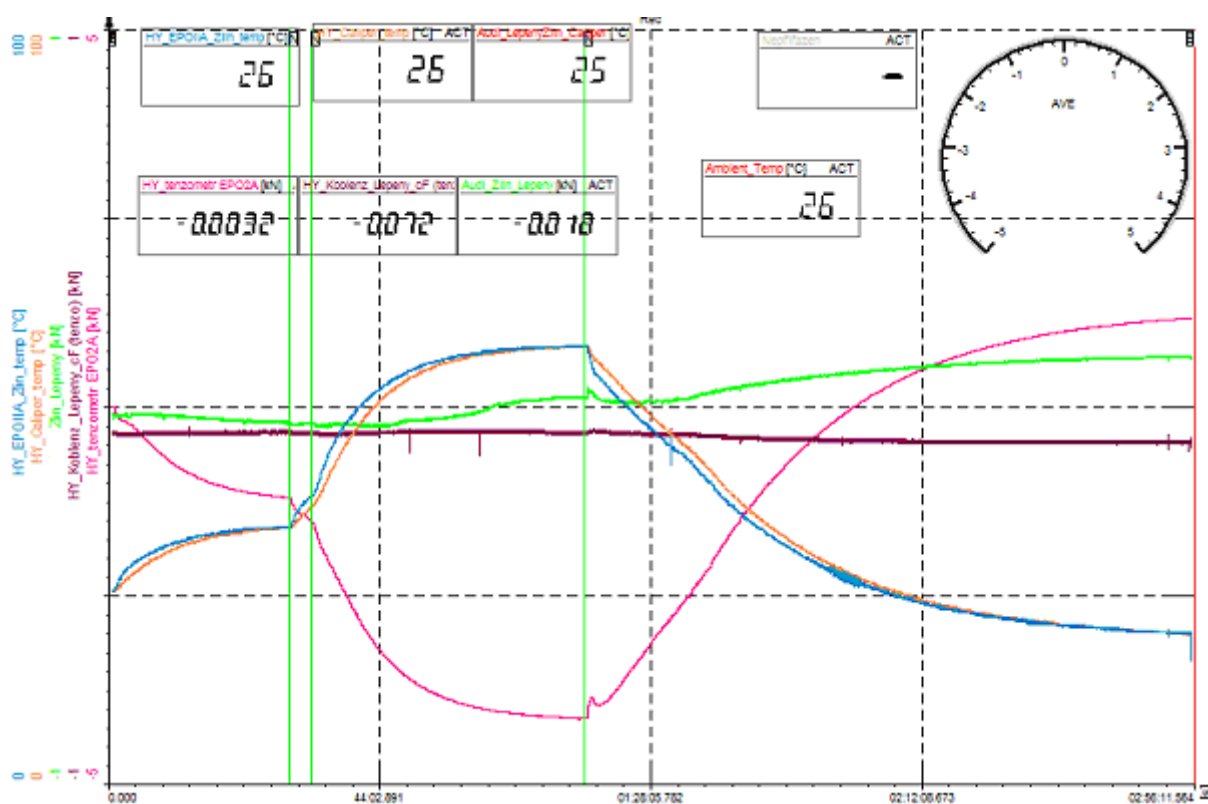


Obr.62 Tepelná komora firmy Votsch

Teplota okolí 20°C, teplota v komoře byla nastavena na teplotu 60°C, doba postupného ohřevu na 60°C byla 1,5 hodiny potom byly dveře komory otevřeny, došlo k prudkému snížení teploty. Průběh ochlazování je znázorněn na Obr.63.



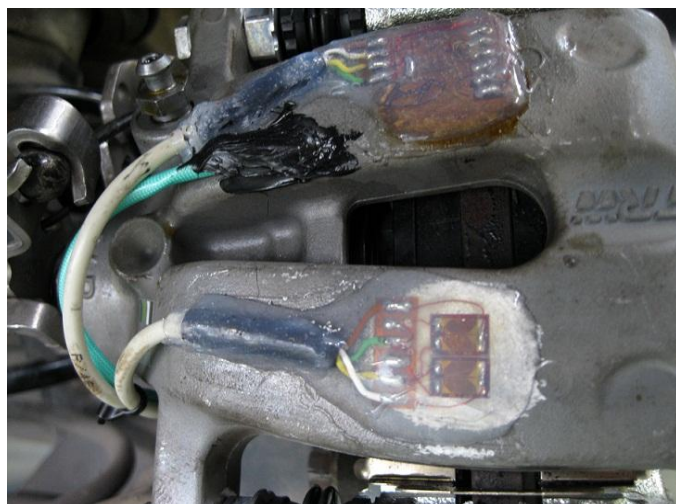
Obr.63 Graf vlastností snímačů v tepelné komoře (v měřítku)



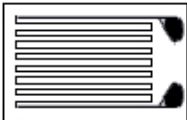


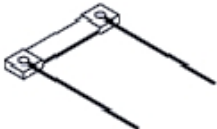
Obr.64 Graf vlastností snímačů v tepelné komoře (zvětšení rozsahu v Y-ose pro Koblenz Lepeny cF a Zlín lepený)

7.4 Měření zbytkové přitlačné síly brzdových destiček za jízdy

Do firmy VST Zlín byla zaslána kotoučová brzda s žádostí o nalepení odporového a polovodičového tenzometru. Na Obr.65 vidíme oba nalepené snímače horní snímač je polovodičový tenzometr, spodní odporový fóliový tenzometr



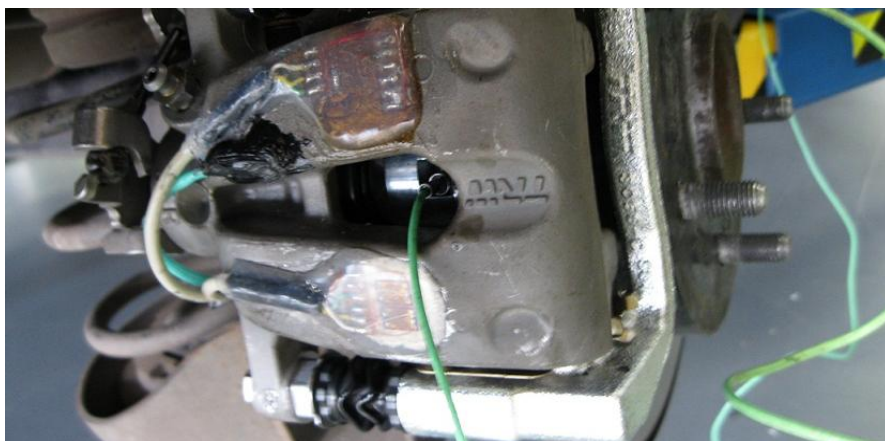
Obr.65 Nalepené dva typy tenzometrů fóliový a polovodičový

Charakteristika	M ateriál aktivní části tenzometru			
	Ni80Cr20	Cu55Ni45	křemík, typ "P"	křemík, typ "N"
uspořádání				
aktivní část tenzometru	drátek o průměru 0.02 až 0.01mm	mřížka z fólie tl. 0.005 až 0.003mm	monokrystal křemíku tloušťky <0.02mm, délky 2 až 10mm, šířky 0.2 až 1mm	
	rozměry (1 až 15) x (1 až 20) mm			
nosná podložka	je nezbytná a je nedílnou součástí tenzometru		není třeba, křemík je "samonosný"	
elektrický odpor (Ohm)	60 až 1 000	120 až 1 000	120 až 10 000	120 až 10 000
součinitel deformační citlivosti (K-faktor)	+2.1 až +3.5	+2.0 až +2.2	+90 až +160	-20 až -120
mezní statická deformace (mm/m,‰)	závisí na chem. složení a mech. a tepelném zpracování materiálu	závisí na chem. složení a mech. a tepelném zpracování materiálu	je určen krystalografickým směrem a měrným odporem monokrystalu křemíku	
	50 až 150	20 až 100	2.5 až 6.0	2.5 až 6.0
modul pružnosti v tahu (Mpa)	217 000	167 000	192000 ve směru [1,1,1]	134000 ve směru [1,0,0]
pracovní teploty (°C)	-200 až 250	-200 až 1 000	-70 až 300	-70 až 300
lom při mezní statické deformaci	přetvárný	přetvárný	křehký	křehký

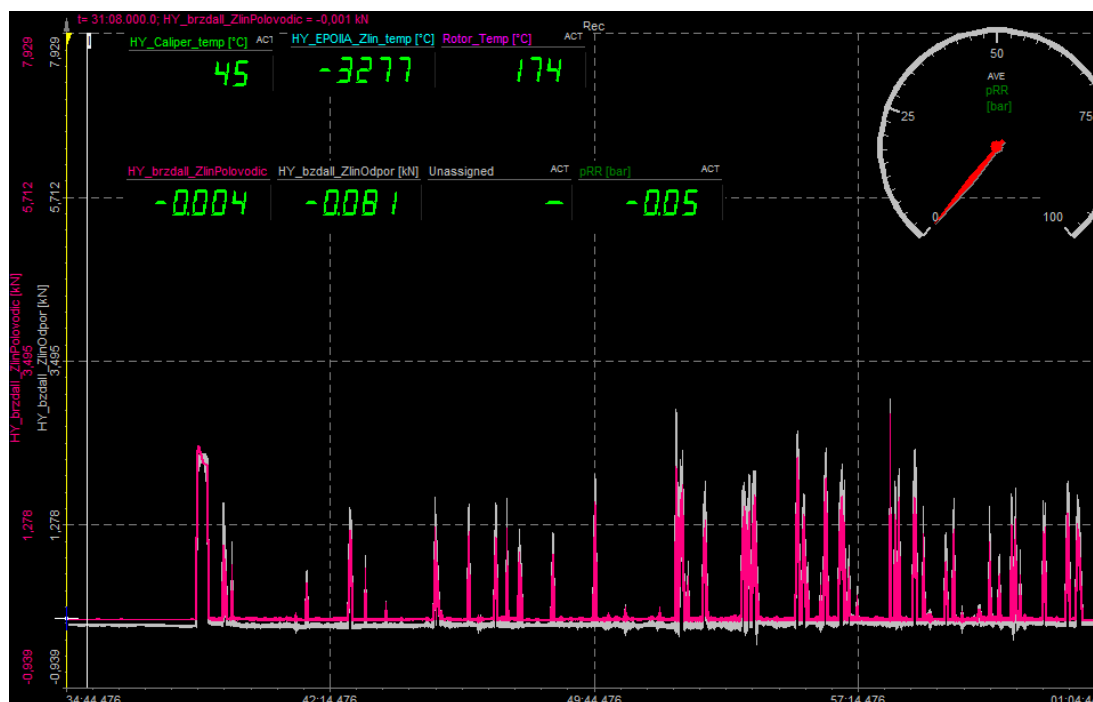
Obr.66 Tabulka parametrů pro fóliový a polovodičový tenzometr [16]

7.4.1 Kalibrace tenzometrů a měření

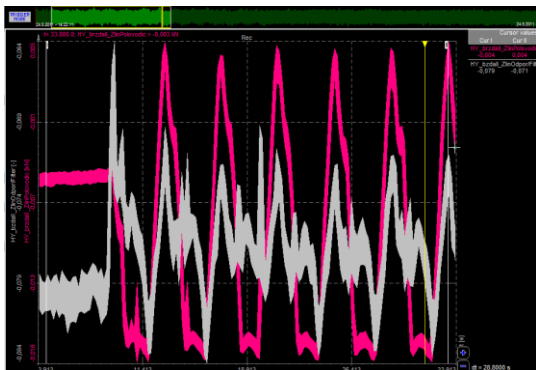
Před samotným měřením bylo nutné oba tenzometry nakalibrovat. Kalibrace byla provedena pomocí vyměnitelné brzdové destičky s piezosnímačem typu 9091 A. Zkouška za jízdy byla prováděna na automobilu značky Kia Venga 1,5 hodinovou jízdou v běžném provozu, za různého režimu městský provoz tak jízda po rychlostní silnici. Kotoučová brzda byla jak ohřívána při brzdění tak ochlazována.



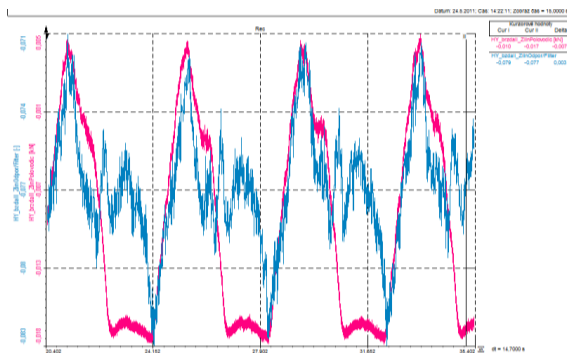
Obr.67 Kalibrace polovodičového tenzometru a tenzometru z fólie



Obr.68 Záznam odporového a polovodičového tenzometru



Obr.69 Zbytková brzdná síla během jízdy

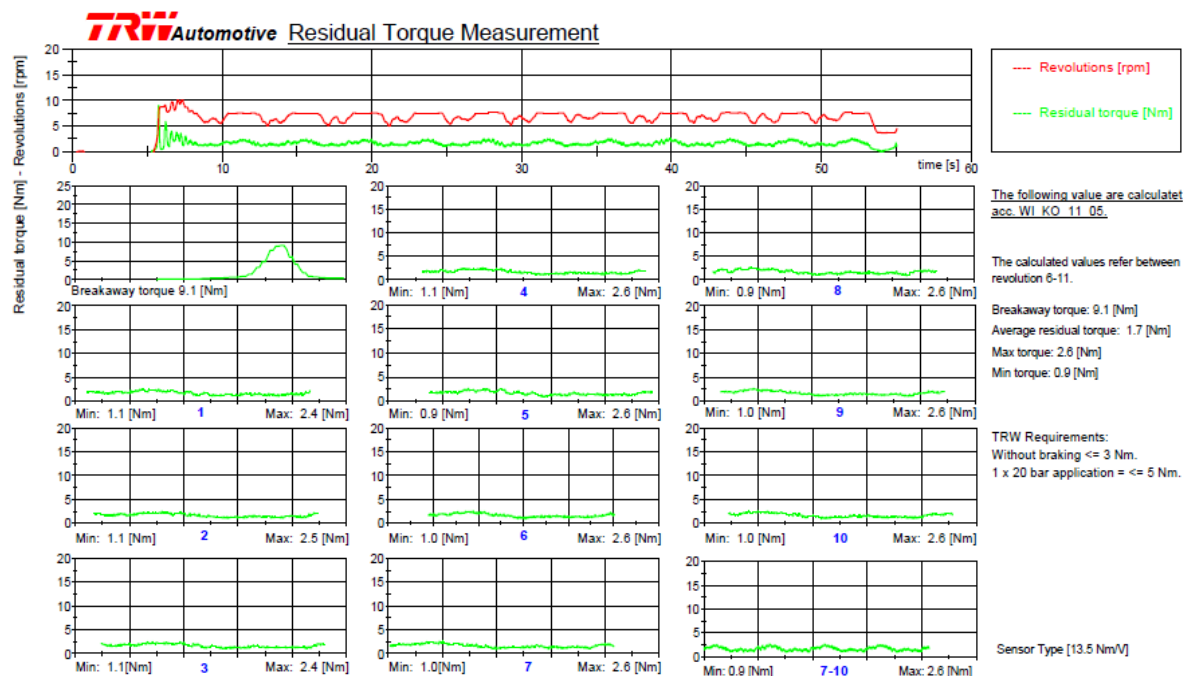


Obr.70 Invertovaná barva

Po dojezdu automobilu byla provedena statická zkouška na zvedáku, za použití přístroje na měření zbytkového momentu. V programu DIAdem byly naměřeny následující hodnoty:

moment při odtržení destiček: 9,1 [Nm] maximální moment: 2,6 [Nm]

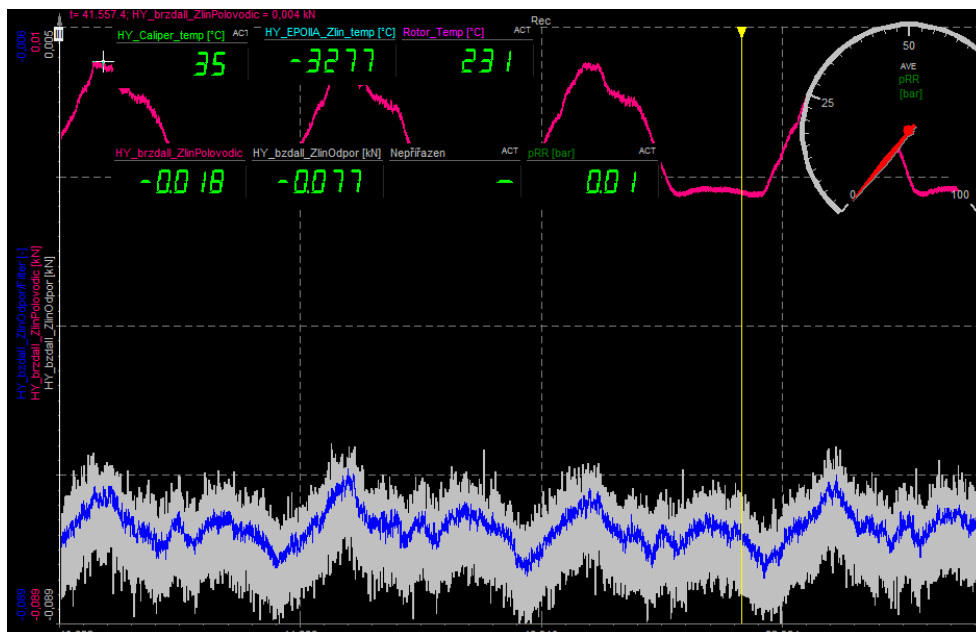
průměrný zbytkový moment: 1,7 [Nm] minimální moment: 0,9 [Nm]



Obr.71 Zbytkový moment po dojezdu vozidla v programu DIAdem

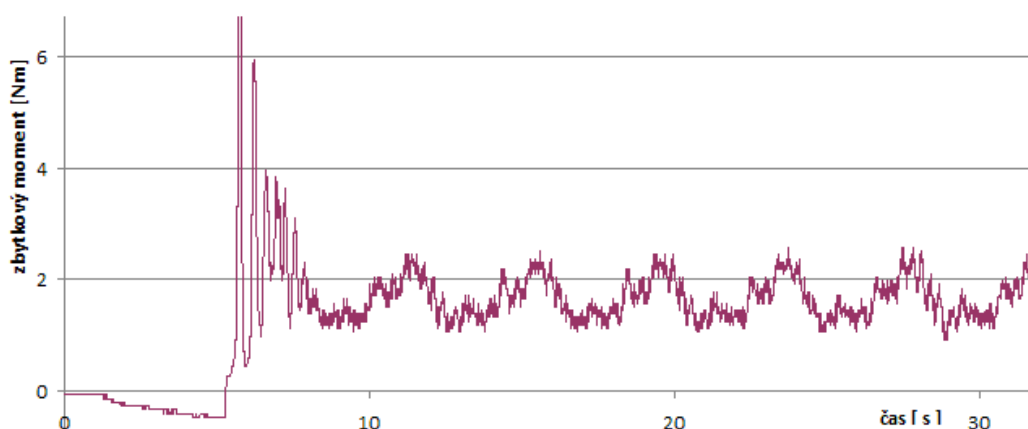
7.4.2 Porovnání odporového a polovodičového tenzometru

Odporový tenzometr je napájen napětím 10 V. Polovodičový tenzometr je vybaven stabilizátorem, je napájen nižším napětím 2 V. Polovodičovým tenzometrem se dají měřit velké rozsahy. Odporový tenzometr je citlivější vhodný na větší změny, ověřováno při kalibraci na 30 barů. Po úpravě naměřených hodnot dostáváme následující výsledky:



Obr.72 Zbytková síla naměřená na brzdových destičkách

Modře zbarvená křivka zobrazuje odfiltrovaný průběh měření zbytkové síly.



Obr.73 Zbytkový moment po dojezdu vozidla exportovaný do EXCELU

Z obou grafů je patrná podobnost naměřené charakteristické křivky.

8. Zhodnocení

Kapacitní snímač tvořený vrstvami z měděného plechu s dielektrikem z plastu je nevhodný, šlo pouze o experimentální měření. Principem je zjištění změny kapacity při stlačení destičky. Jednotlivé vzorky s různými dielektriky pryž, PET, PE jejich závislosti byly vykresleny v grafech, většinou podle možnosti jejich stlačení se jednalo o strmé charakteristiky, které se obtížně přepočítávají na změnu kapacity a následně na tlak. Naměřená kapacita při stlačení byla naměřena velmi malá v řádu pikoFaradů. Předpokládaná síla sevření se pohybuje 0-5 kN čemuž musí odpovídat i plast použitý jako dielektrikum. Samotná zástavba pod píst na brzdovou destičku je velmi problematická – nevhodné pro použití.

Piezoelektrický snímač Kistler typu 9021 A prstýnek, je pravděpodobně nejpresnější měřidlo a je umístěn přesně v ose pístu kotoučové brzdy. Nevýhody jsou velká tloušťka 10mm, nutnost vyndat jednu z brzdových destiček a použít nahrazující přípravek s otvorem pro prstýnek. Lze použít pouze při měření na zvedáku a pro kalibraci snímačů.

Piezoelektrický snímač Kistler typu 9232 A umístěný na třmenu, nepřímé měření. Snímač snímá deformaci třmenu na základě těchto údajů, piezoelektrický jev - vznik náboje - změna napětí, převod na sílu. Použitelný i pro měření při jízdě. Velká nevýhoda je závislost na teplotě. Teplota na třmenu při jízdě 20-45 °C, teplota na kotouči 20-250 °C. (Měřeno při zkušební jízdě). Velká výhoda vysoká citlivost a rychlost při měření. Podařilo se po úpravě nastavení, změřit zbytkový moment při jízdě, který zatím bylo možno měřit pouze staticky při zvednutí vozidla. Bylo by zajímavé porovnat jev tzv. vrzání brzd při brzdění s akustickou zkouškou pomocí mikrofonů.

Tenzometr nalepený na třmenu, tenzometr odporového typu podle kontrolní simulace napětí a prodloužení v programu Pro/Mechanika nalepen na správném místě, pravděpodobně mají s lepením tenzometru v TRW Koblenz velké zkušenosti. Nevýhoda nutnost nalepení na brzdu. Tenzometr je poměrně přesný v řádu 0,1-0,2 kN. Tenzometr je vybaven kalibračním tlačítkem umožňujícím kalibraci na polovičním rozsahu. V tepelné komoře vychází z porovnávaných snímačů nejlépe.

Tenzometr EPO 2A, průtahoměr má velkou výhodu nemusí se lepit. Pouze se našroubuje na dva šrouby. Jako navrhované připevnění šroubů přivařením na třmen

nebo vytvořením závitů do připravených otvorů se jako výhodnější ukázala druhá možnost. Snímač obsahuje plný můstek je tvořen čtyřmi polovodičovými tenzometry upevněnými v uzavřeném pouzdře. Vyšší citlivost než u tenzometru z TRW Koblenz. Při kontrolním měření v teplotní komoře se ukázalo, že je teplotně velmi závislý při změně o 10 °C byla změna síly až 1 kN.

Lepený polovodičový tenzometr z VTS Zlín, při vložení do teplotní komory vykazoval podobné odchylky jako tenzometr z Koblenz.

Odporový fóliový tenzometr je napájen napětím 10 V. Polovodičový tenzometr je vybaven stabilizátorem, je napájen s nižším napětím 2V. Polovodičovým tenzometrem se dají měřit velké rozsahy. Odporový tenzometr je citlivější vhodný na větší změny, ověřováno při kalibraci na 30 barů. Princip funkce tenzometru je na bázi změny roztažnosti materiálu.

Odporový fóliový zvládá menší rozsah do 3000N je citlivější v daném rozsahu než polovodičový. Odporový fóliový cena 100,- Kč. Polovodičový je dražší 1x 300 Kč pro jedno měření jsou potřeba čtyři. Odporový fóliový tenzometr se lépe nalepuje.

Výsledná křivka zjištěná odporovým fóliovým tenzometrem se velice přibližuje naměřenému zbytkovému momentu přístrojem s programem DIAdem. Naopak polovodičový tenzometr neukazuje přesný tvar křivky. Odporový fóliový je použitelný do 40 barů (přibližně 3000 N) pak přestává měřit. Má vysokou citlivost na tomto rozsahu. Po úpravě vyfiltrováním zašuměného signálu dává velmi dobré výsledky.

9. Závěr

Každý snímač, tenzometr je se svými vlastnostmi určitým způsobem specifický. Piezoelektrický snímač Kistler typu 9021 A prstýnek, je určen pro přímé měření v ose pohybujícího pístu kotoučové brzdy. Jeho nevýhodou je jeho tloušťka.

Piezoelektrický snímač Kistler typu 9232 A umístěný na třmenu, pro nepřímé měření. Snímač snímá deformaci třmenu na základě těchto údajů, převede na sílu. Vysoká rychlost a citlivost. Velkou nevýhodou je závislost na teplotě.

Tenzometr nalepený na třmenu v TRW Koblenz, tenzometr odporového typu. Tenzometr vybavený kalibračním tlačítkem umožňujícím kalibraci na polovičním rozsahu. V tepelné komoře vychází z porovnávaných snímačů nejlépe.

Tenzometr EPO2A, průtahoměr s možností montáže našroubováním. Nevýhoda šroubový spoj má určitou nepřesnost a je velmi závislý na teplotě, viz. graf z teplotní komory a graf v příloze, pro účely měření v TRW nevhodný.

Odporový fóliový tenzometr zvládá menší rozsah do 3000N a je citlivější v daném rozsahu než polovodičový. Odporový fóliový tenzometr je levný a lépe se nalepuje. Po vyfiltrování zašuměného signálu dává velmi dobré výsledky. Pro účely měření zbytkové síly brzdových destiček vychází z mnoha hledisek nejlépe.

Seznam použité literatury a softwaru:

Literatura:

- [1] Vlk, F.: Podvozky motorových vozidel. Nakladatelství a vydavatelství VLK.
Brno 2006
- [2] Vlk, F.: Diagnostika motorových vozidel. Nakladatelství a vydavatelství VLK.
Brno 2006
- [3] Červinka, O. aj.: Stroje a zařízení pro průmyslovou dopravu.
Skriptum VŠST, Liberec
- [4] Svoboda, J. : teorie dopravních prostředků. Vozidla silniční a terénní.
Skriptum ČVUT, Praha 1986
- [5] Šalamoun, Č.: Motorová vozidla IV. Skriptum ČVUT, Praha 1991
- [6] Breuer, B.: Bremsenhandbuch
(3. erweiterte Auflage) ATZ/MTZ-Fachbuch Vieweg-Verag, 2003
- [7] Příručka firmy Kistler
- [8] Ďaďo, S.,Kreidl, M.: Senzory a měřící obvody Skriptum ČVUT, Praha 1996
- [9] příručka programu DEWESoft
- [10] Jenčík,J.,Volf,J.: Technická měření ČVUT 1998
- [11] Tomáš, M.: Vlastnosti dielektrik prezentace
- [12] Němeček, P.: Podklady k přednáškám a cvičením -KDMS I,KDMS II

- [13] <http://www.dewetron.cz/dewetron/dewesoft.htm>
- [14] <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k42-tlak.htm>
- [15] http://www.kistler.com/cz_cz-cz/KistlerCountryHome_KCS/Kistler.html
- [16] <http://www.proautomatizaci.cz/cidla-elektrickych-neelektrickych-velicin/202-tenzometry-v-automatizaci>
- [17] http://cs.wikipedia.org/wiki/Kotoučová_brzd

Software:

DIAdem

DEWESoft

Pro/ENGINEER Wildfire 4.0.

Pro/Mechanika

Seznam příloh:

Katalogový list snímače Kistler 9021 A.....	Příloha 1
- Certifikát o kalibraci	
Katalogový list zesilovače Kistler 5015 A.....	Příloha 2
- Certifikát o kalibraci	
Katalogový list přístroje DEWE-43.....	Příloha 3
Prospekt přístroje DEWE-43.....	Příloha 4
Katalogový list tenzometrického snímače typ E002/A2.....	Příloha 5
- návrh postupu při upevnění tenzometru	
Grafy naměřené v programu DEWESoft.....	Příloha 6

Výkresová dokumentace:

KVM-DP-001.....	třmen brzdy
KVM-DP-002.....	sestava brzdy
Dokumentace je obsažena i na přiloženém CD (pdf, dwg)	

TECHNICKÉ PARAMETRY SNÍMAČE KISTLER 9021 A

1. DESCRIPTION

1.1. Introduction

Quartz load washers are piezoelectric force transducers which convert a force into an electrical charge. In a so-called charge amplifier this is converted into a voltage. Display, recording or data processing are effected in the usual manner.

Thanks to the extremely high resolution of quartz it is possible to measure a change in force of the order of 1 N under a preload of several tons.

Such force transducers have an inherently high rigidity and correspondingly high resonant frequency. This allows them to be fitted in measuring objects without altering the elastic behaviour of these significantly.

The shape (washer) and the relatively small dimensions make for versatility and simple installation. Standard accessories are available for special duties.

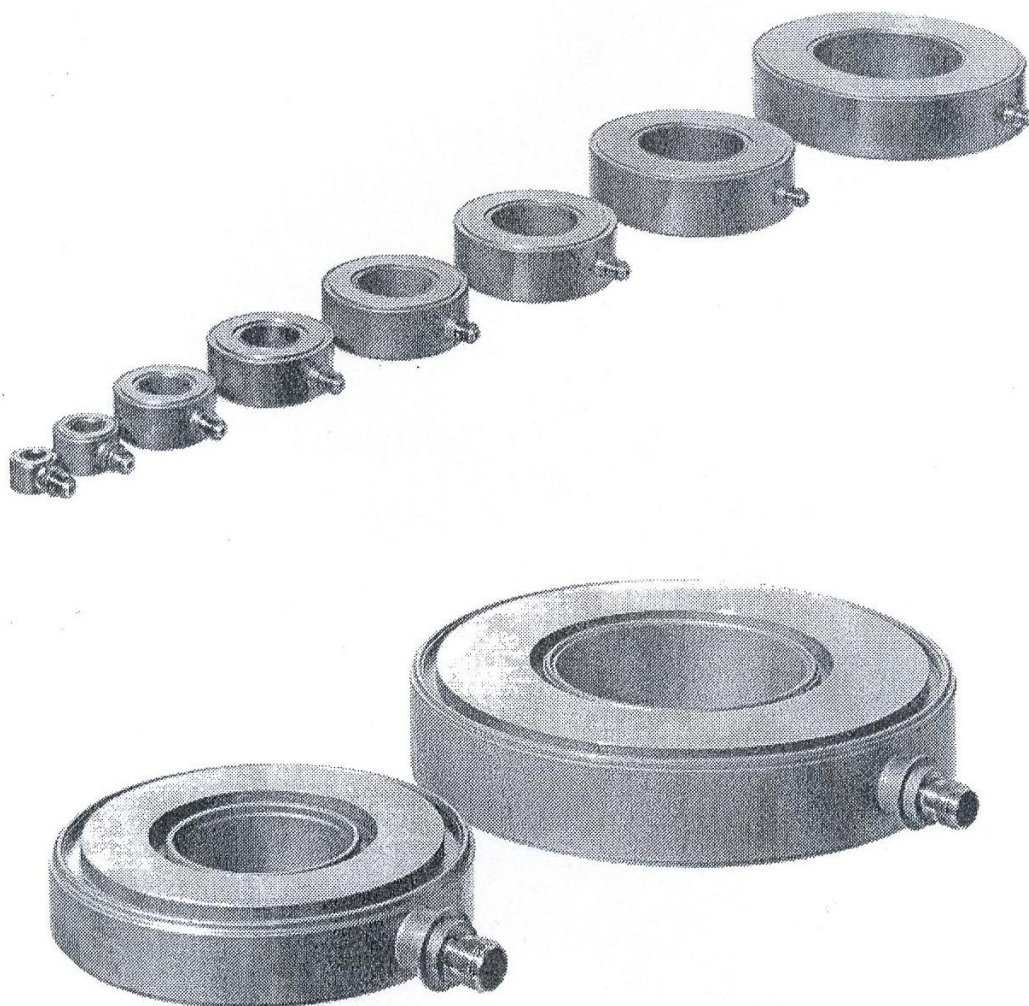


Fig. 1: Quartz load washers 9001, 9011A ... 9091A

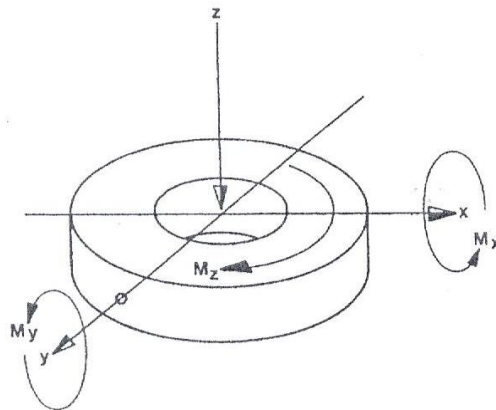
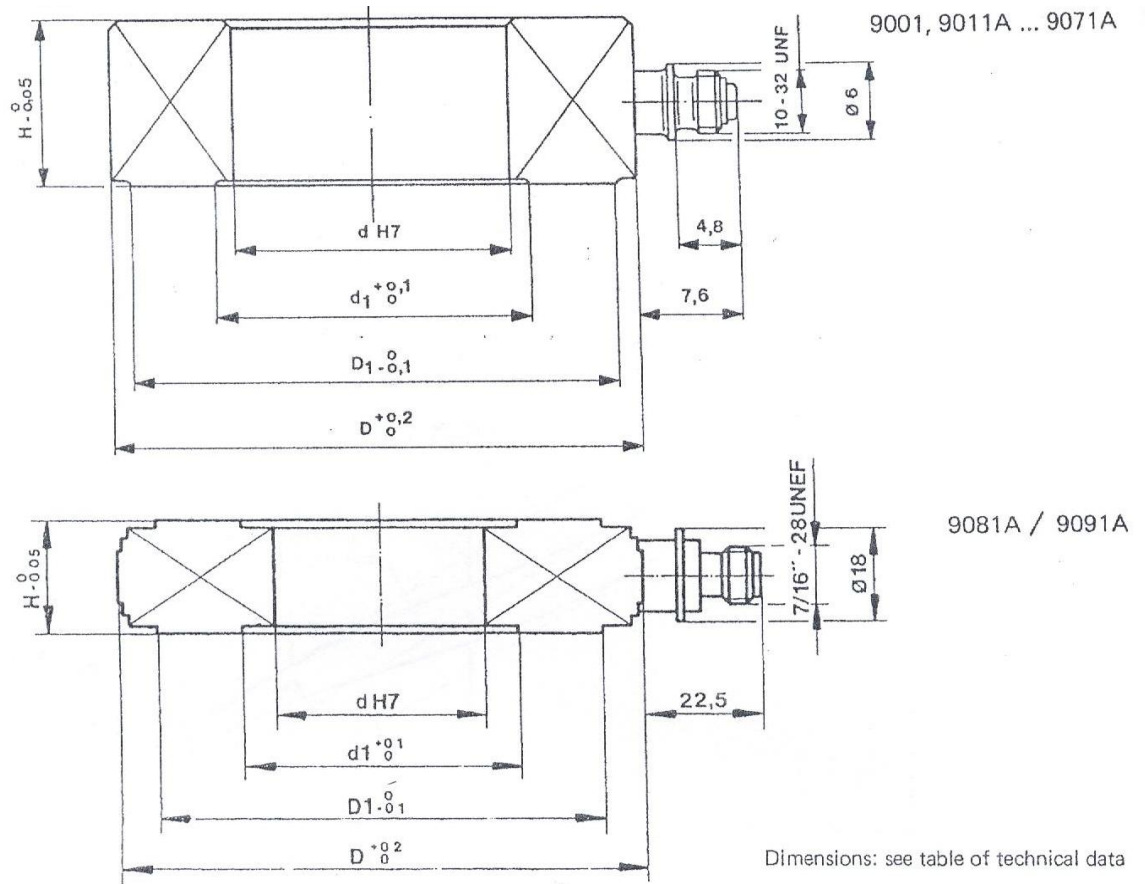
1.2. Technical data (Table 1)

Where necessary the technical data are described in more detail in subsection 1.3.: Explanations to the Technical Data. For dimensions and axis designations see Fig. 2.

Type		9001	9011A
Range F_z (FS)	kN	0 ... 7,5	15
Calibrated part range	kN	0 ... 0,75	1,5
Overload	kN	9	18
Shear F_{xy} (with $F_z = 0,5 \cdot FS, \mu = 0,12$)	kN	0 ... $\pm 0,45$	0,9
Torque M_z (with $F_z = 0,5 \cdot FS, \mu = 0,12$)	Nm	0 ... $\pm 1,6$	4,5
Bending moment M_{xy} (with $F_z = 0,5 \cdot FS$)	Nm	0 ... ± 5	15
Sensitivity	pC/N	$\approx -4,3$	$\approx -4,3$
Linearity	%	$\leq \pm 1$	$\leq \pm 1$
Hysteresis	%	$< 0,5$	$< 0,5$
Threshold	N	0,01	0,01
Shear sensitivity $xy \rightarrow z$	%	< 3	< 3
Bending moment sensitivity	N/Nm	< 4	< 2
Rigidity	kN/ μm	≈ 1	$\approx 1,8$
Resonant frequency (approximate)	kHz	≈ 200	≈ 150
Operating temperature range	$^{\circ}C$	-196...200	-196...200
Temperature coefficient of sensitivity	%/ $^{\circ}C$	-0,02	-0,02
Temperature error (without preload)	N/ $^{\circ}C$	$\approx -1,5$	≈ 3
Insulation resistance at 20 $^{\circ}C$	Ω	$\geq 10^{14}$	$\geq 10^{14}$
Capacitance	pF	≈ 8	≈ 23
Dimensions	d (see Fig. 2)	4,1	6,5
	d_1	5,7	8,7
	D	10	14,5
	D_1	8,4	12,2
	H	6,5	8
Quartz surface	mm^2	39,5	79,6
Resistance moment of the quartz surface	mm^3	58,7	176
Weight	g	3	8
Material of housing: stainless steel			

9021A	9031A	9041A	9051A	9061A	9071A	9081A	9091A
35 3,5 42	60 6 72	90 9 108	120 12 144	200 20 240	400 40 480	650 65 780	1200 120 1300
2,1 17 60	3,6 37 130	5,4 70 240	7,2 110 370	12 235 830	24 695 2500	39 1470 2500	72 4000 7000
$\approx -4,3$ $\leq \pm 1$ $< 0,5$	$\approx -4,3$ $\leq \pm 1$ $< 0,5$	$\approx -4,3$ $\leq \pm 1$ $< 0,5$	$\approx -4,3$ $\leq \pm 1$ $< 0,5$	$\approx -4,3$ $\leq \pm 1$ $< 0,5$	$\approx -4,3$ $\leq \pm 1$ $< 0,5$	$\approx -2,2$ $\leq \pm 1$ $< 0,5$	$\approx -2,2$ $\leq \pm 1$ $< 0,5$
0,01 < 3 < 1	0,01 < 3 < 1	0,01 < 4 $< 0,5$	0,01 < 4 $< 0,5$	0,01 < 4 $< 0,3$	0,01 < 7 $< 0,5$	0,02 < 3 < 1	0,02 — $< 0,3$
$\approx 3,5$ ≈ 100 —196...200	≈ 6 ≈ 80 —196...200	$\approx 7,5$ ≈ 65 —196...200	≈ 9 ≈ 55 —196...200	≈ 14 ≈ 45 —196...200	≈ 26 ≈ 30 —196...200	$\approx 24,4$ ≈ 6 —50...100	≈ 65 — —50...100
—0,02 ≈ 3 $\geq 10^{14}$ ≈ 37	—0,02 ≈ 15 $\geq 10^{14}$ ≈ 54	—0,02 ≈ 20 $\geq 10^{14}$ ≈ 55	—0,02 ≈ 30 $\geq 10^{14}$ ≈ 64	—0,02 ≈ 35 $\geq 10^{14}$ ≈ 148	—0,02 ≈ -120 $\geq 10^{14}$ ≈ 203	—0,02 ≈ -400 $\geq 10^{14}$ ≈ 1100	—0,02 ≈ -750 $\geq 10^{14}$ ≈ 2200
10,5 13,9 22,5	13 17,0 28,5	17 21,0 34,5	21 25,1 40,5	26,5 31,0 52,5	40,5 45,0 75,5	40,5 53,0 100	66 80,0 145
19 10	24,4 11	30,4 12	36,4 13	48,2 15	71 17	85 22	130 28
210 726 21	375 1628 38	538 2920 57	730 4753 80	1265 10'542 157	2678 32'707 370	3361 68'717 840	7333 222'871 2350

1.



z Axis in which a load washer measures force.

x, y Axes in which shear forces may occur but are not measured.

M_x, M_y, M_z Moments about the axes x, y, z. Moments affect the measuring range for the force F_z but are not measured.

Fig. 2: Dimensions and axis designations of load washers

1.3.6. Linearity

Linearity (ISA): The closeness of a calibration curve to a specified straight line.

For piezoelectric force transducers this straight line is determined as follows (see Fig. 4; to make matters clearer the curve has been distorted in the ordinate direction):

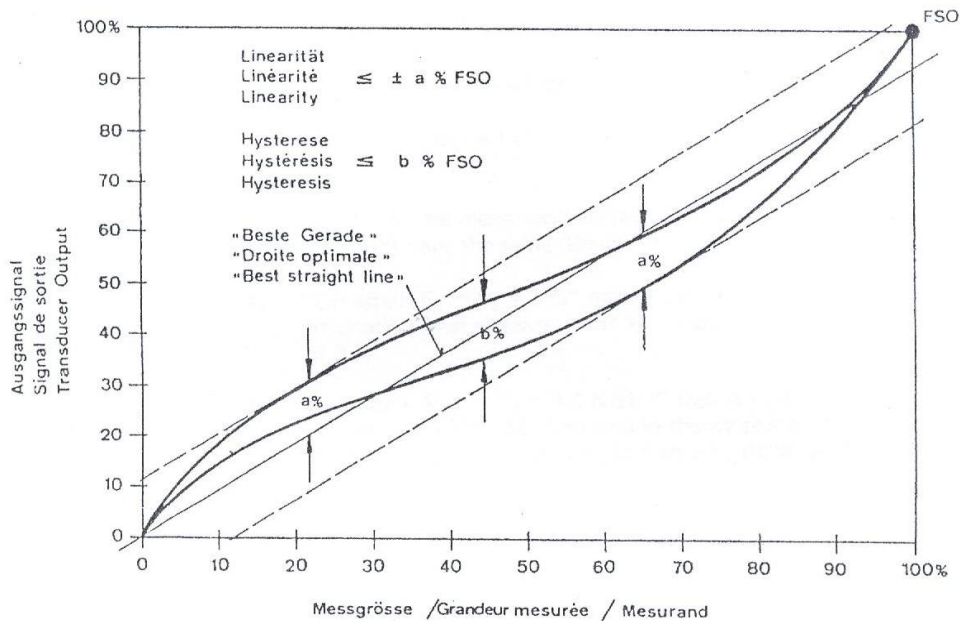


Fig. 4: Linearity

Two parallels are sought, as close together as possible but enclosing the entire calibration curve. In addition the median parallel must pass through the zero (no force, no output signal). The slope of this median parallel is the sensitivity of the transducer. Half the interval between the two parallels (measured in the direction of the ordinate), expressed as a percentage of FSO, is the linearity.

This definition describes the independent linearity with forced zero.

Although the quartz itself yields an electrical charge exactly proportional to the applied load, certain unavoidable deviations result from the mechanical assembly. In each part range, uncalibrated as well, the linearity stays within the indicated percentage of the particular part range. (FSO means "full scale output", i.e. the algebraic difference between the output signals representing the measurands at the upper and lower range limits.)

1.3.7. Hysteresis

Hysteresis (ISA): The greatest difference in the output signal for any value of the measurand within the specified range when this value is reached first with increasing then with diminishing measurand.

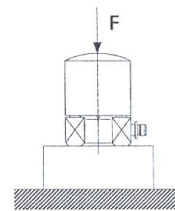
Quartz itself has virtually no measurable hysteresis. Owing to the mechanical assembly a measurable hysteresis may appear, but it remains below the stated percentage of the particular FSO in any range. If more hysteresis is ascertained, this means that the load washer has not been fitted properly.

Kalibrierschein KRAFT Calibration Certificate FORCE

Type 9021A

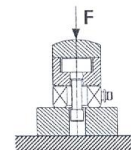
Serial No. 1667064

Kalibriert durch Calibrated by	Datum Date	
G. Barilli	25.01.2008	
Referenzgeräte Reference Equipment	Typ Type	Serien-Nr. Serial No.
Gebrauchsnorm Working Standard	Kistler 9361A	1022953
Ladungsverstärker Charge Amplifier	Kistler 5017B	623638
Ladungskalibrator Charge Calibrator	Kistler 5395A	530634
Umgebungstemperatur Ambient Temperature	Relative Feuchte Relative Humidity	
°C	%	
25	34	



Messergebnisse Results of Measurement

Kalibrierter Bereich Calibrated Range	Empfindlichkeit Sensitivity	Linearität Linearity
kN	pC / N	$\leq \pm \% \text{FSO}$
0 ... 35	-4,214	0,26
0 ... 3,5	-4,180	0,12



Berechnete Empfindlichkeit für eine Standardvorspannung 7 ... 10 kN mit Typ 9422A21
Calculated Sensitivity for a Standard Preload 7 ... 10 kN with Type 9422A21
pC / N
-3,835

Messverfahren Kontinuierliche Kalibrierung, Vergleichsverfahren
Measurement Procedure Continuous Calibration, Comparison Method

Bestätigung Confirmation

Die Geräte halten die Herstellertoleranzen gemäss Spezifikationen der Datenblätter ein. Wir bestätigen, dass das oben identifizierte Gerät nach den vorgeschriebenen Verfahren geprüft wurde. Alle Messmittel sind auf nationale Normale rückverfolgbar. Kistler betreibt die SCS (Swiss Calibration Service) Kalibrierstelle Nr. 049, akkreditiert nach ISO 17025. Das Kistler Qualitätsmanagement System ist nach ISO 9001 zertifiziert.

The equipment meets the manufacturing tolerances according to the specification data sheets. We confirm that the device identified above was tested by the prescribed procedures. All measuring devices are traceable to national standards. The SCS (Swiss Calibration Service) Calibration Laboratory No. 049 is operated by Kistler and accredited per ISO 17025. The Kistler Quality Management System is certified per ISO 9001.

Kistler Instrumente AG
Eulachstrasse 22 Tel. +41 52 224 11 11 ZKB Winterthur BC 732 IBAN: CH67 0070 0113 2003 7462 8
PO Box Fax +41 52 224 14 14 Swift: ZKBKCHZZ80A VAT: 229 713
CH-8408 Winterthur info@kistler.com Account: 1132-0374.628 ISO 9001 certified

www.kistler.com

Seite page 1 / 1

TECHNICKÉ PARAMETRY ZESILOVAČE KISTLER 5015 A

Technical Data

KISTLER
measure. analyze. innovate.

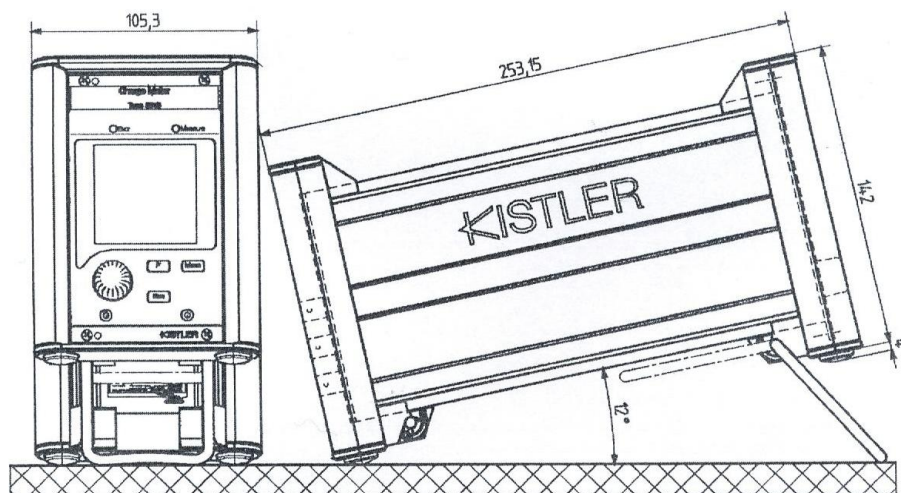


Fig. 2: Desktop Type 5015A1... (stackable)

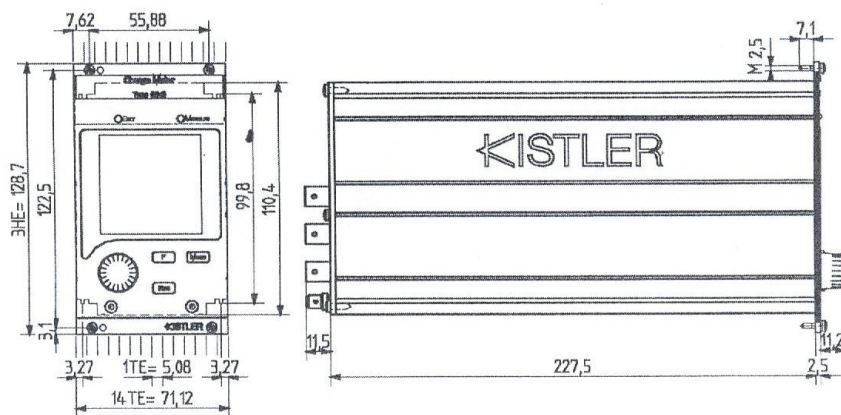


Fig. 3: 19" rack plug-in Type 5015A0...

5015A_002-121e-01.08

Kalibrierschein Ladung Calibration Certificate Charge

Type 5015A1000 Serial No. 1643913

Kalibriert durch Calibrated by		Datum Date
Ch. Gerber		04.02.2008
Referenzgeräte Reference Equipment	Typ Type	Serien-Nr. Serial-No.
Ladungskalibrator Charge Calibrator	5395A0	1490905
Umgebungstemperatur Ambient Temperature		Relative Feuchte Relative Humidity
°C		%
24		40

Geräteinstellungen Instrument settings		
HP Filter	LP Filter	Ausgangsbereich FS Output Range FS
HP Filter	LP Filter	V
DC (Long)	1,0 kHz	10

Messergebnisse Results of Measurement

Nullpunktabweichung ohne Filter Offset Voltage Filter off	Nullpunktabweichung mit Filter Offset Voltage Filter on	Measure Sprung Measure Jump	Drift
mV	mV	mV	pC/s; mV/s
0,7	0,6	2,0	0,01

Filter 30 kHz; obere Grenzfrequenz (-3 dB) Filter 30 kHz; upper cutoff frequency (-3 dB)	Obere Grenzfrequenz bei voller Bandbreite (-3 dB) Upper cutoff frequency at full bandwidth (-3 dB)
kHz	kHz
30,9	198

Bereichseinstellung Range setting	Eingangs-Ladung Input charge	Abweichung Spannungsausgang Voltage output error	Abweichung Anzeige Readout error
pC	pC	%	%
4,990	-4,990	0,0	0,0
9,990	-9,990	0,0	0,0
49,90	-49,90	0,0	0,0
99,90	-99,90	0,0	0,0
499,0	-499,0	0,0	0,1
999,0	-999,0	0,0	0,0
4'990	-4'990	0,0	0,0
9'990	-9'990	0,0	0,0
49'900	-49'900	0,0	0,0
99'900	-99'900	0,0	0,1
219'900	-219'900	0,0	0,0
1'099'000	-1'099'000	0,1	0,1
2'000'000	-2'000'000	0,0	0,0

Bestätigung Confirmation

Wir bestätigen, dass das oben identifizierte Gerät nach den vorgeschriebenen Verfahren geprüft wurde. Alle Messmittel sind auf nationale Normale rückverfolgbar. Kistler betreibt die SCS (Swiss Calibration Service) Kalibrierstelle Nr. 049, akkreditiert nach ISO 17025. Das Kistler Qualitätsmanagement System ist nach ISO 9001 zertifiziert.

We confirm that the device identified above was tested by the prescribed procedures. All measuring devices are traceable to national standards, the SCS (Swiss Calibration Service) Calibration Laboratory No. 049 is operated by Kistler and accredited per ISO 17025. The Kistler Quality Management System is certified per ISO 9001.

Kistler Instrumente AG

Eulachstrasse 22
PO Box
CH-8408 Winterthur

Tel. +41 52 224 11 11
Fax +41 52 224 14 14
info@kistler.com

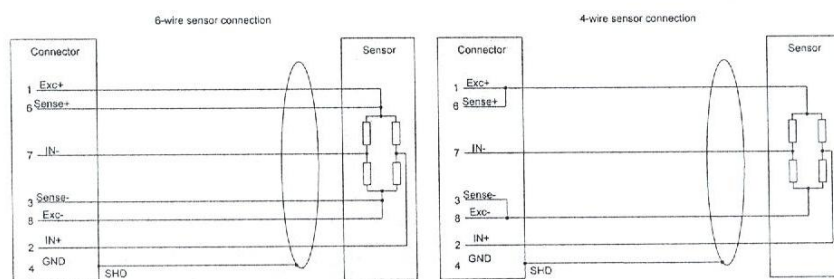
ZKB Winterthur BC 732
Swift: ZKBKCHZZ80A
Account: 1132-0374.628

IBAN: CH67 0070 0113 2003 7462 8
VAT: 229 713
ISO 9001 certified

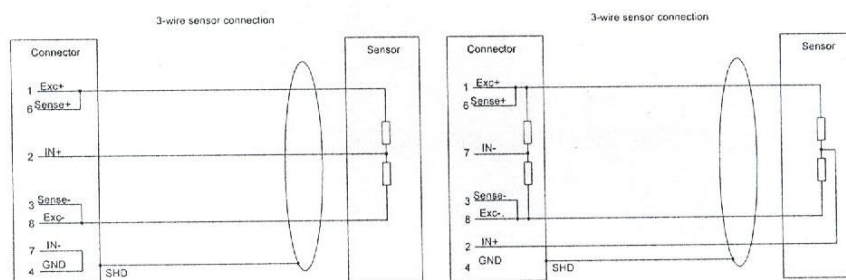
www.kistler.com

Bridge sensor connection

Full bridge 10V excitation:



Half bridge 10V excitation:



Note: Bridge completion needs to be done in the connector.



TECHNICKÉ PODMÍNKY
TENZOMETRICKÝ SNÍMAČ PRŮTAHU
typ E002/A2

1. Všeobecné údaje

Průtahoměr je elektromechanický převodník určený ke snímání velikostí tahových či tlakových, statických i dynamických deformací, vznikajících ve strojních částech působením sil. Na měřené části je průtahoměr upevněn dvěma šrouby. Snímač slouží k měření deformace těla snímače, která se přenáší na deformační člen osazený křemíkovými odporovými tenzometry, převádějícími deformaci na elektrický signál.

Křemíkové tenzometry mají deformační citlivost 60x vyšší, než odporové tenzometry foliové či drátkové, což umožňuje dimenzovat měřicí člen se značnou rezervou pevnosti. Pevnostní rezerva měřicího členu, spolu s vysokou odolností křemíkových tenzometrů vůči dynamickému namáhání, poskytují životnost měřicího systému vyšší než 10^7 cyklů jmenovitého zatížení. Vynikající stabilita charakteristik křemíkových tenzometrů a speciální tepelné zpracování deformačního členu zaručují dlouhodobou stabilitou metrologických parametrů.

2. Uspořádání a funkce snímače

Deformační člen snímače hmotnosti je uspořádán jako snímač tvaru "brýle", s měřicí částí upravenou tak, aby jmenovitou hodnotu zatížení snímače převedla na poměrnou deformaci $5 \cdot 10^{-4}$. Na měřicí části jsou nalepeny čtyři křemíkové odporové tenzometry typu AP125-6-12, zapojené do Wheatstoneova můstku. Životnost křemíkových tenzometrů při zatěžování jmenovitým zatížením je vyšší než 10^8 cyklů jmenovitého zatížení. Měřicí systém snímače neobsahuje žádné pohyblivé části, které by podléhaly opotřebení.

Deformační člen snímače je vyroben z vytvrzené hliníkové slitiny typu AlCu4Mg1 tepelně zpracované na vysokou mez pružnosti, vysokou rozměrovou stabilitu a dostatečnou houževnatost. Jeho povrch je chráněn galvanicky vyloučeným povlakem tvrdého niklu.

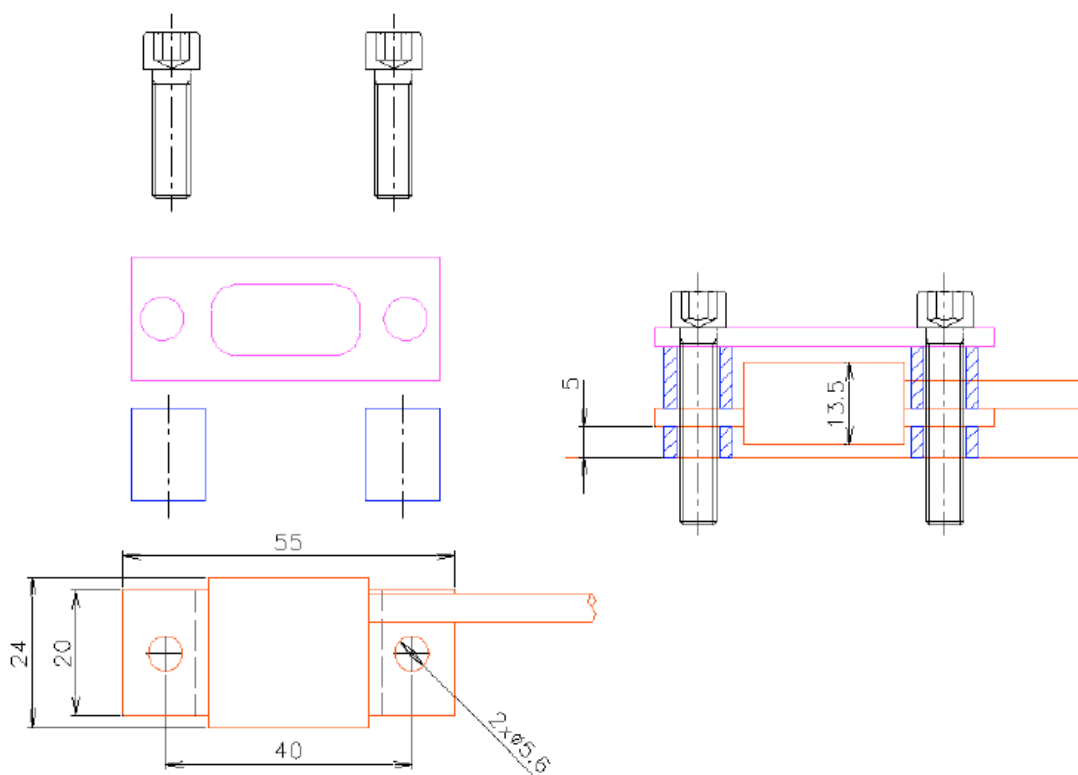
Tenzometrický systém snímače je umístěn v dutinách v tělese snímače a před klimatickými a mechanickými vlivy ho chrání vrstva pružného plastu, zaplňující dutiny až do úrovně povrchu

Zapojení vývodů:

Barva:	účel:
hnědá	+I _{nap}
bílá	- I _{nap}
černá	+U _{výst}
modrá	-U _{výst}

CHARAKTERISTIKA	JEDNOTKA	HODNOTA
Jmenovitý rozsah	$\mu\text{m/m}$	500
Jmenovitý výstupní signál (rozdíl mezi výstupním signálem zatíženého a nezatíženého snímače) při napájení $i_{\text{nap}}=10\text{mA}$ (orientační hodnota)	mV	150
Výstupní signál nezatíženého snímače při napájení $i_{\text{nap}}=10\text{mA}$ (signál z nenamontovaného snímače, při montáži dojde k jejímu posunu)	mV	0 ± 0.2
hystereze (v % jmenovitého rozsahu snímače)	%	± 0.1
Sloučená chyba (hystereze + nelinearita) - v % jmenovitého rozsahu snímače	%	± 0.5
Bezpečná přetžitelnost	%	200
Dlouhodobá stabilita (v % jmenovitého rozsahu snímače)	%	$<\pm 0.1\%$
Teplotní závislost výstupního signálu nezatíženého snímače (po namontování na konstrukci se uplatní navíc rozdíl teplotních roztažností snímače a konstrukce)	$\%/^{\circ}\text{C}$	<0.01
Teplotní závislost výstupního signálu zatíženého snímače (po namontování na konstrukci se uplatní navíc rozdíl teplotních roztažností snímače a konstrukce)	$\%/^{\circ}\text{C}$	<0.03

Rozměry a tvar snímače:

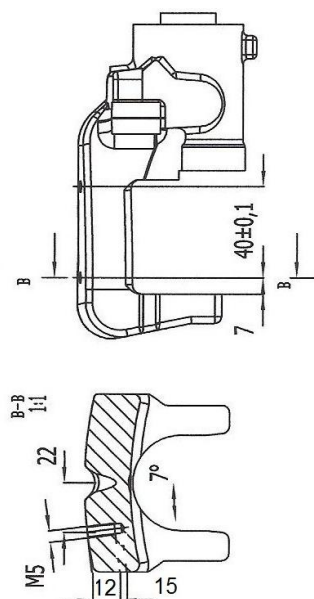
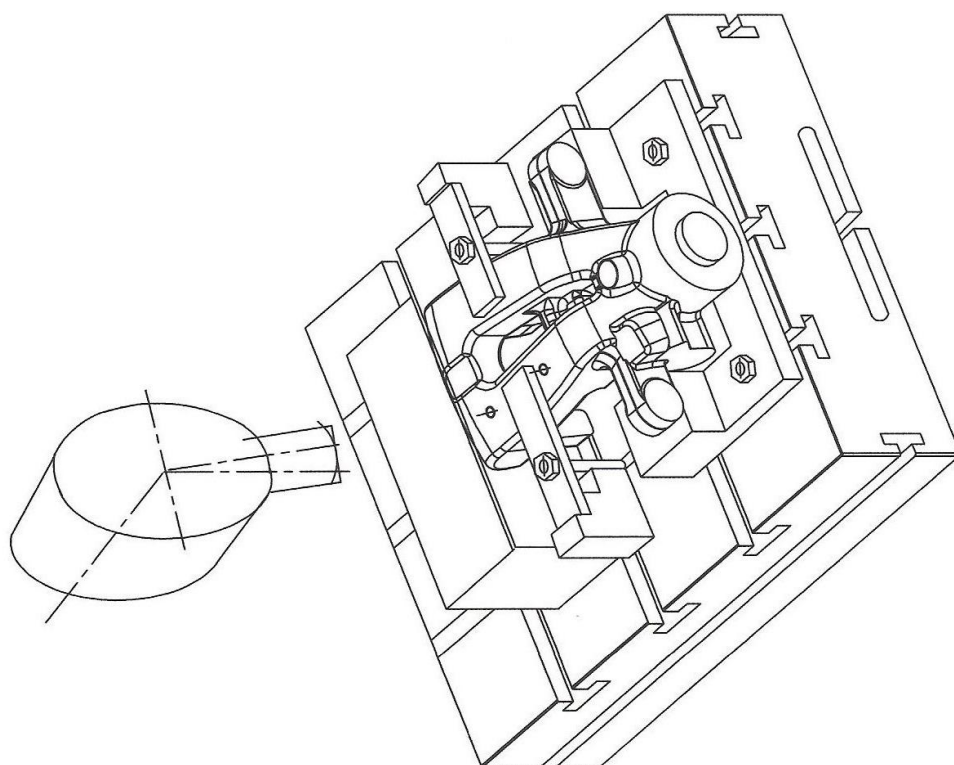


Návrh postupu při upevnění tenzometru typ EP02A

- úprava odlitku navrtáním dvou otvorů se závity
- upevnění namontováním snímače a utažení momentovým klíčem

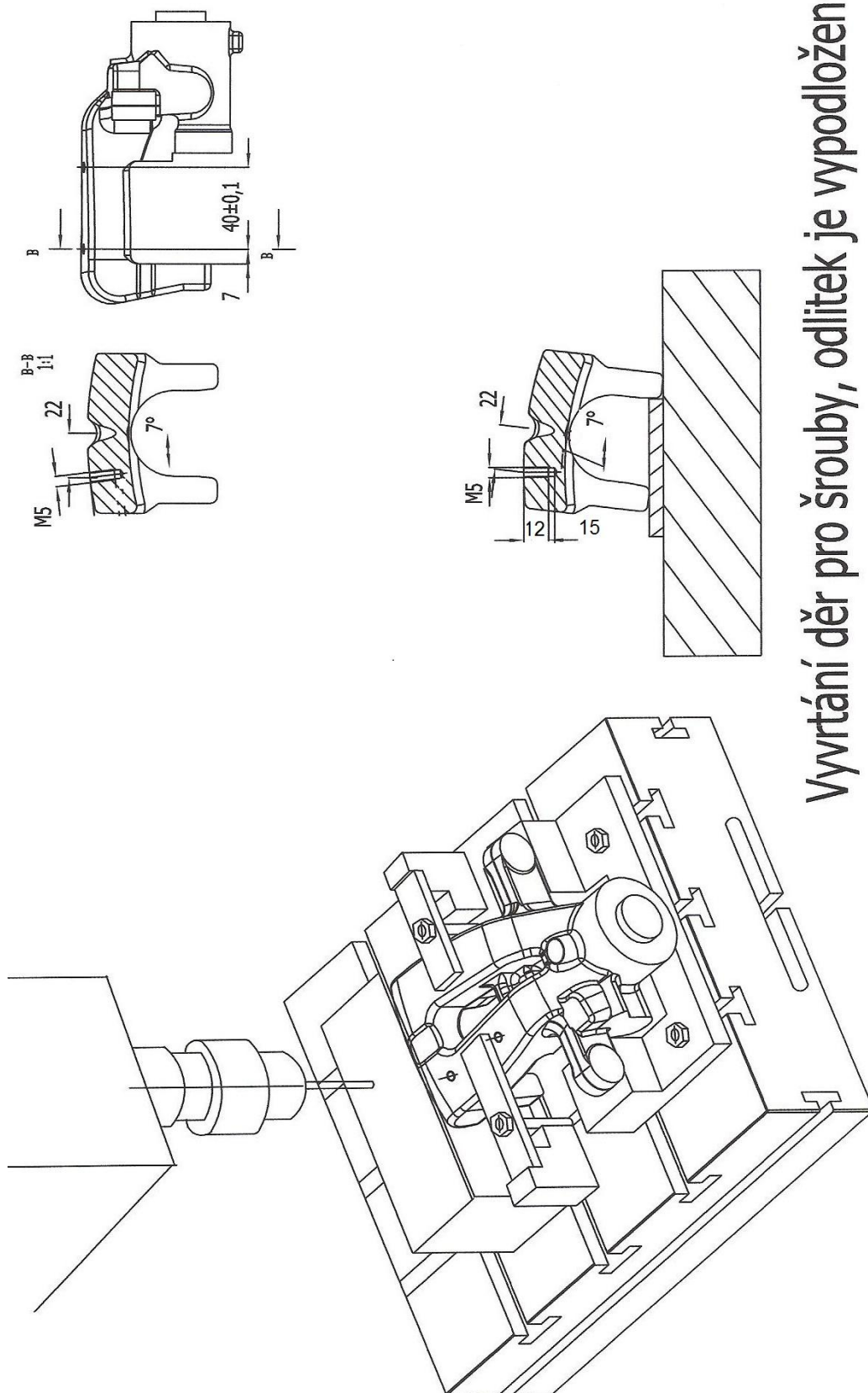
Nevýhoda šroubový spoj má určitou nepřesnost a je velmi závislý na teplotě, viz. graf z teplotní komory a graf v příloze, pro účely měření v TRW je nevhodný a nebude se používat.

Spolu s odporovým fóliovým tenzometrem a polovodičovým tenzometrem bylo zasláno z firmy VTS Zlín DVD s návodem na nalepování tenzometrů.



Vyosení svislé osy frézky o 7°

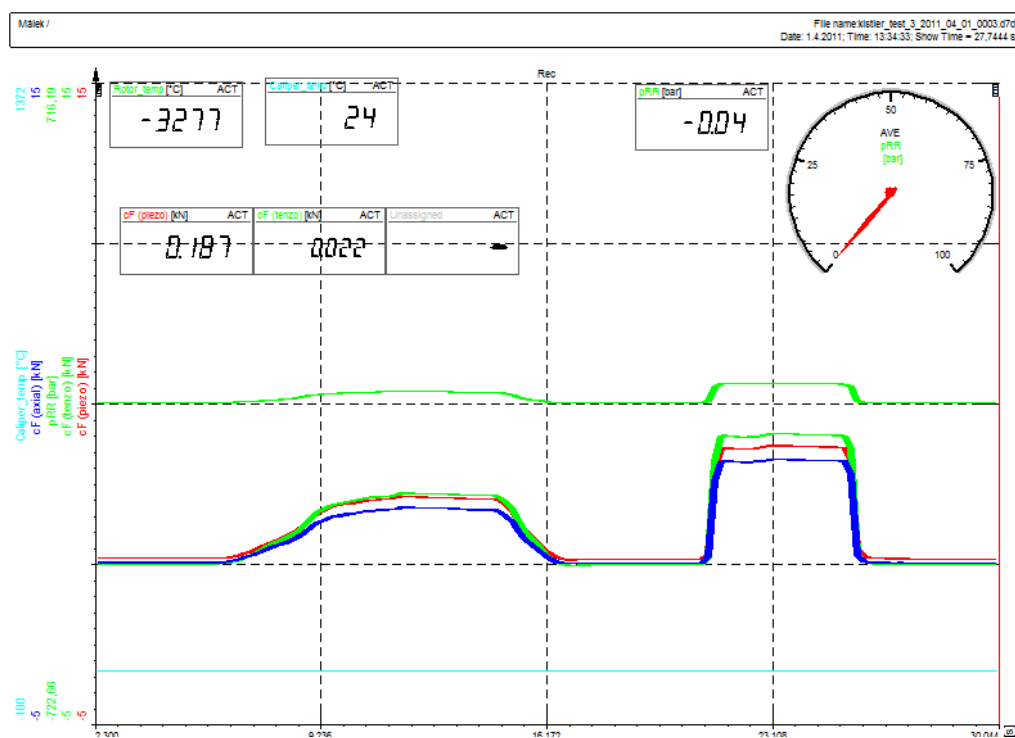
Návrh vyvrtání otvorů na frézce - varianta 1



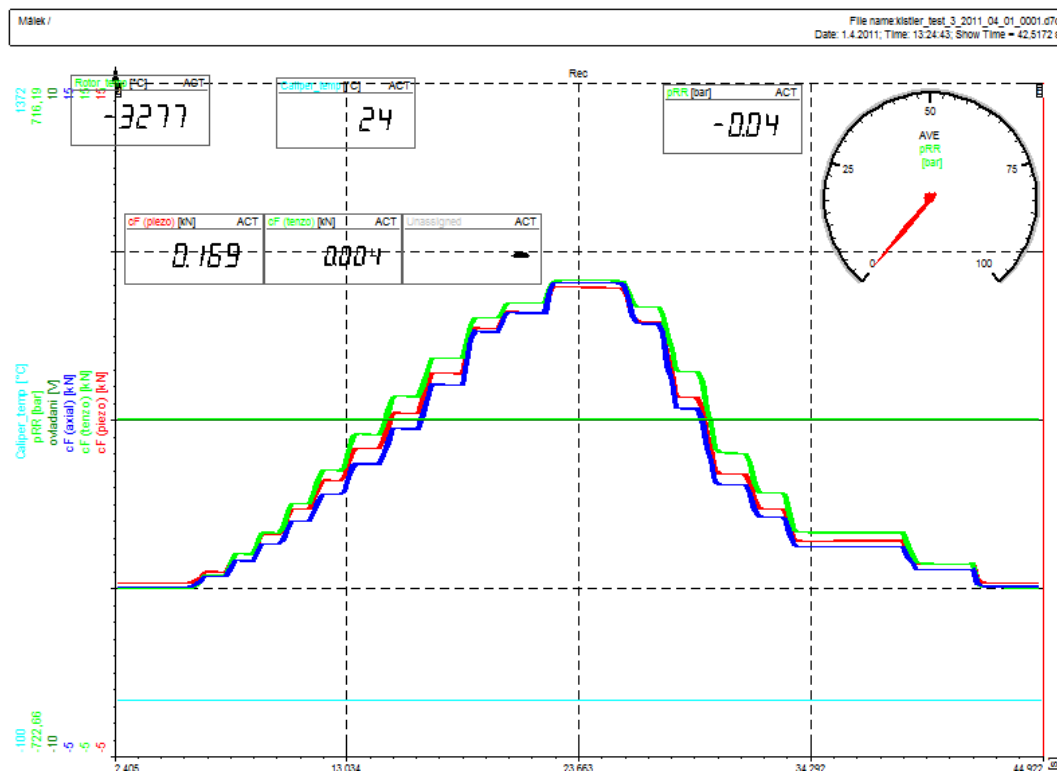
Výrtání děr pro šrouby, odlitek je vypodložen

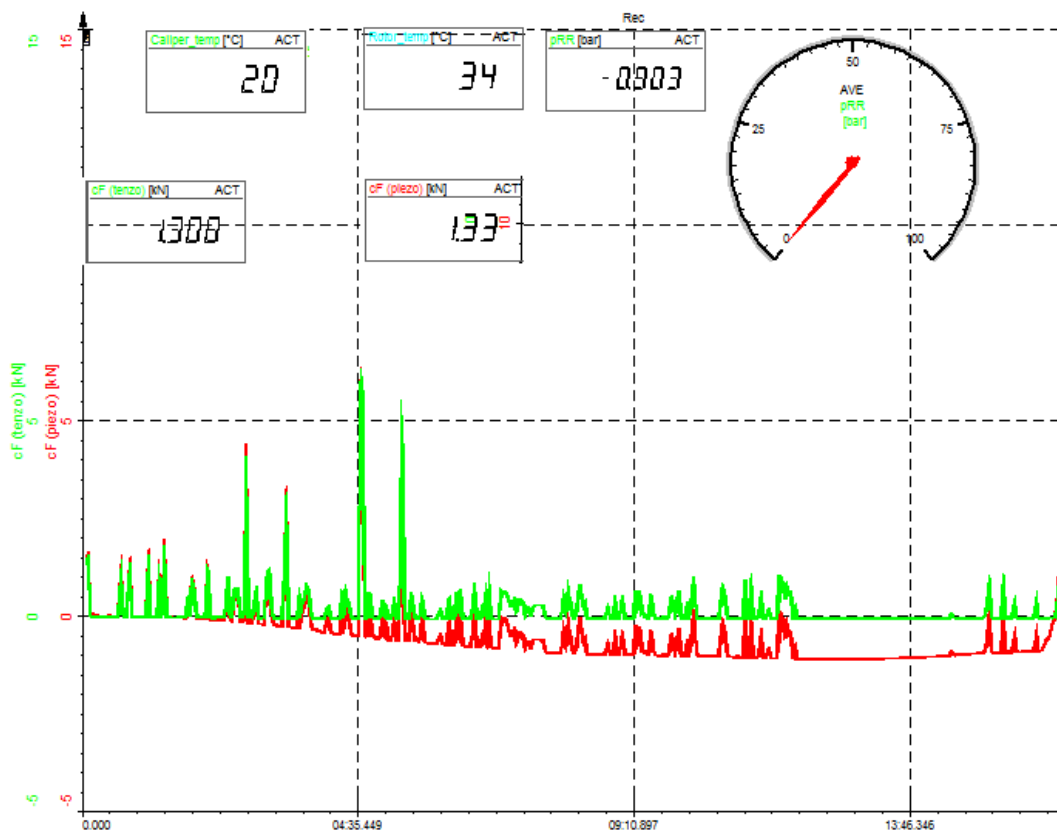
Návrh vyvrtání otvorů na vrtačce - varianta 2

Grafy naměřené v programu DEWESoft

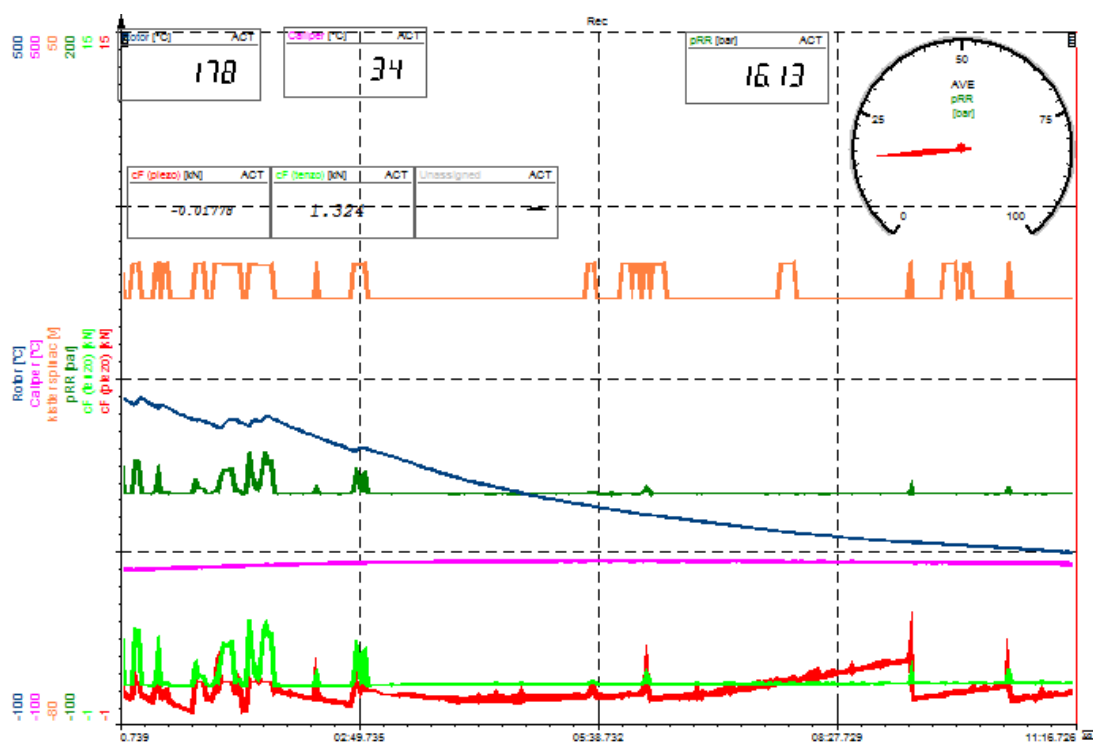


pRR - tlak v brz. kapalině, cF (tenzo) – tenzometr, cF(axial) Kistler 9021 A
(prstýnek) cF(piezo) Kistler 9232 A



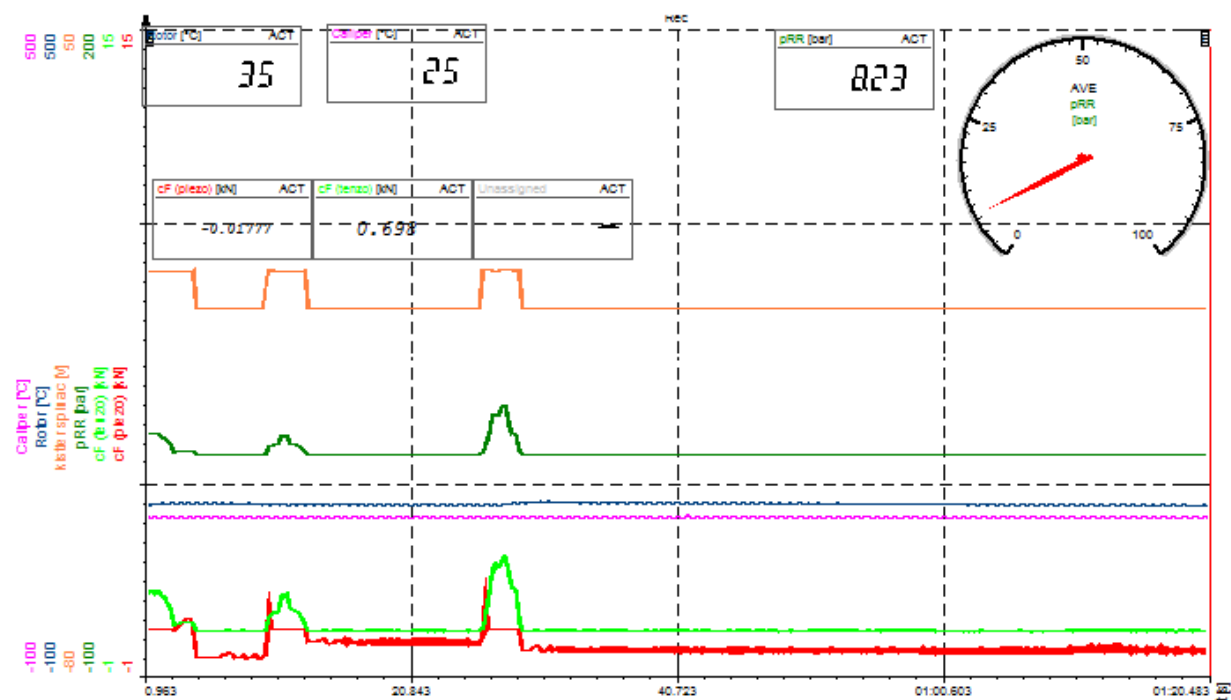


Dynamická zkouška: Z Grafu je patrný vliv při mírném ohřevu brzdy

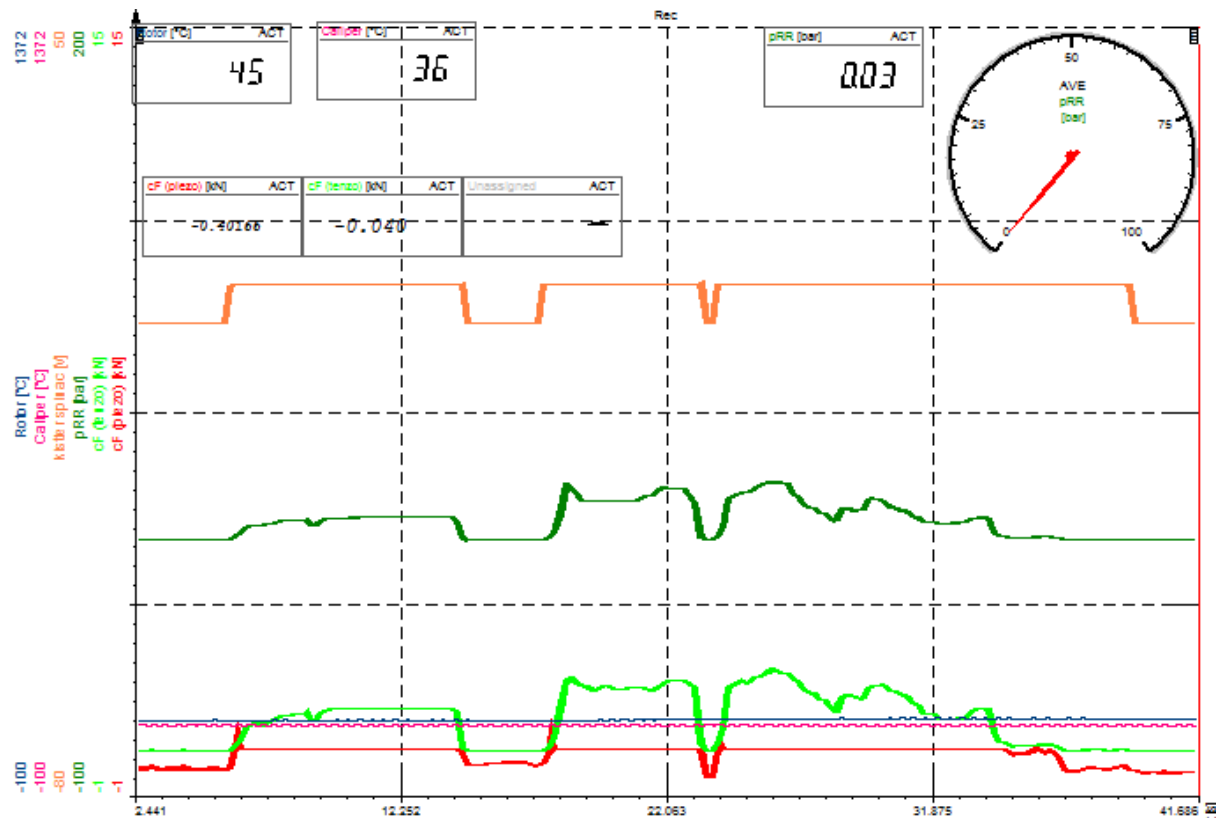


Dynamická zkouška: Z Grafu je patrný vliv při chlazení brzdy

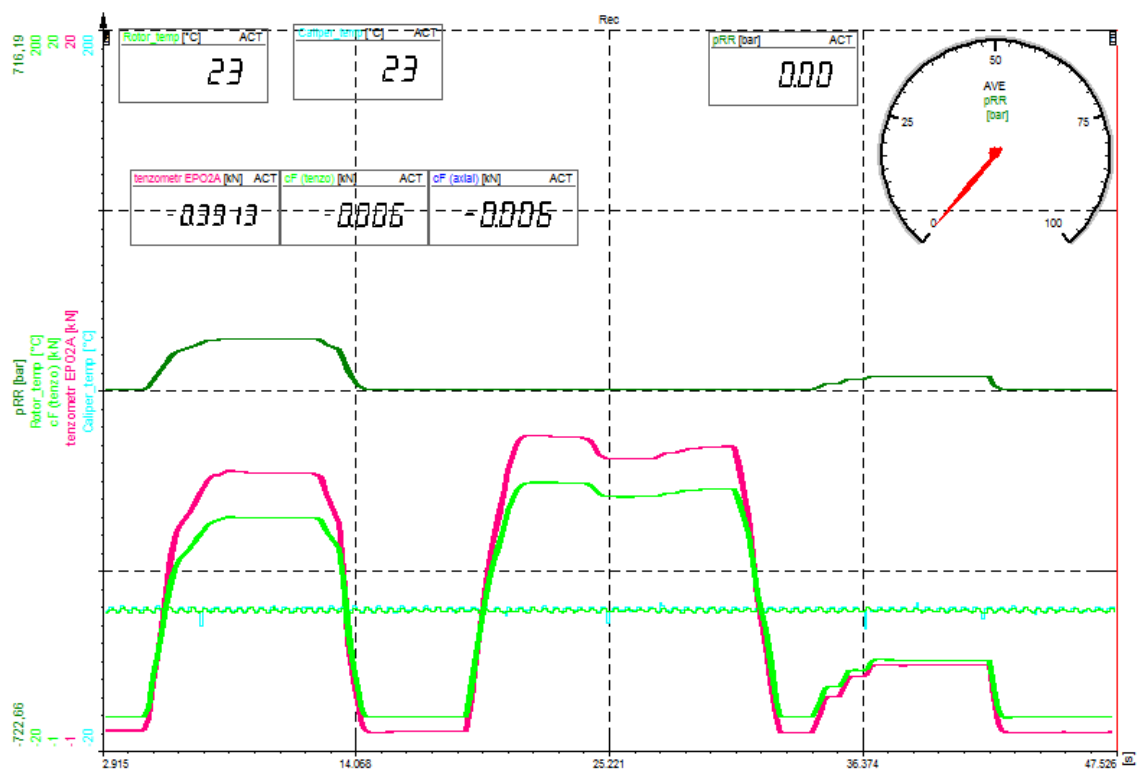
Pokles teploty kotouče ze 167 °C na 51 °C



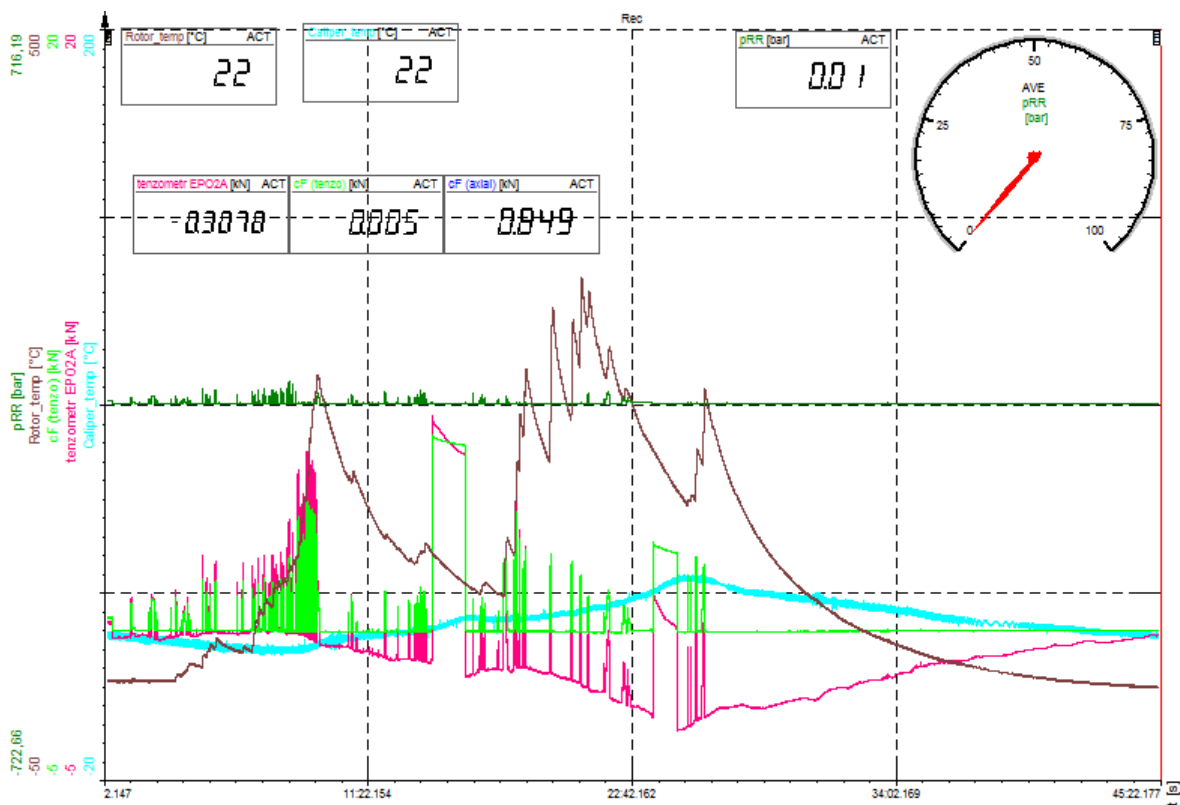
Funkce spínač kistler (oranžová) umožňuje sepnutí a vypnutí funkce na náběžné hraně. Oba snímače fungují na různém rozsahu citlivosti. Proto je snahou piezoelektrického snímač funkcí spínač kistler nulovat a tím zmenšit odchylku vzniklou měnící se teplotou.



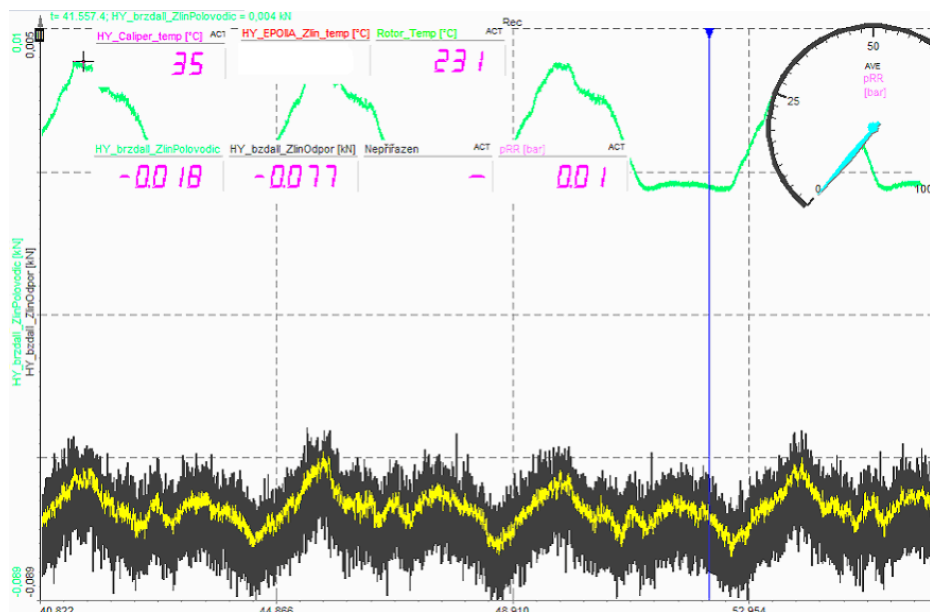
Sjezd ze svahu s přibrzdováním brzdou



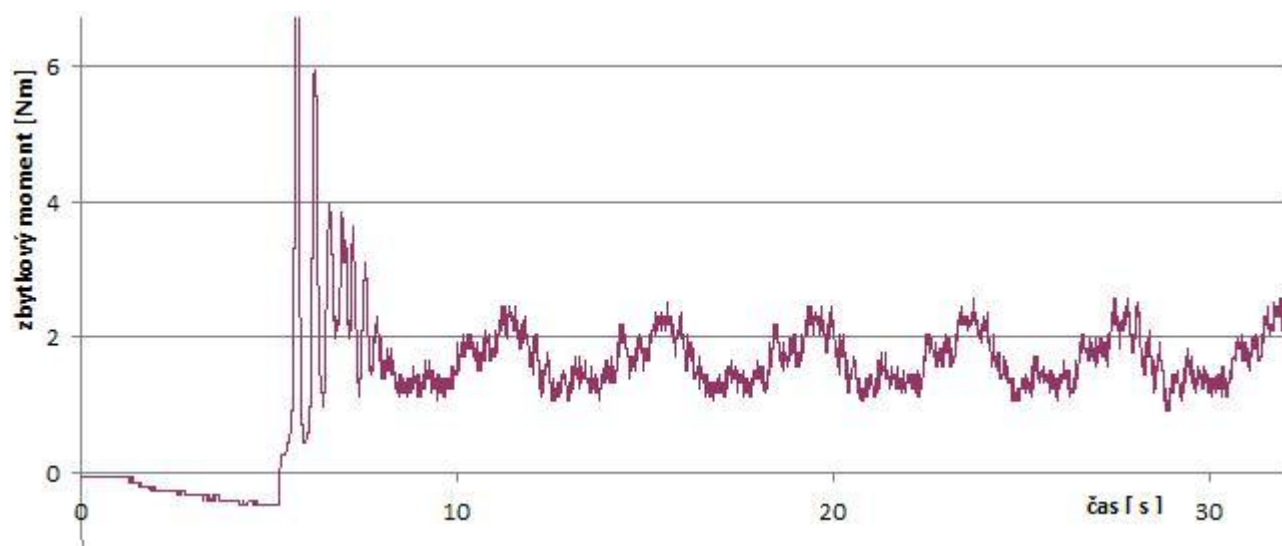
Statická zkouška pRR - tlak v brz. kapalině, Rotor temp – teplota rotoru,
cF (tenzo) – tenzometr, EPO2A- tenzometr, Caliper temp- teplota
třmenu



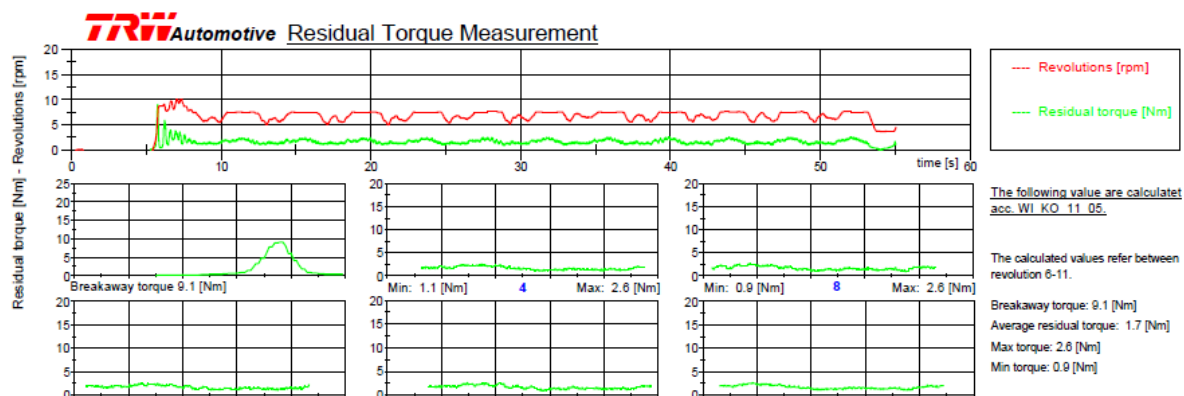
Dynamická zkouška tenzometru EPO 2A (ohřev kotouče až na 270°C)



Dynamická zk.: Zbytková přitlačná síla na destičky HY_brzdall_ZlinOdpor[kN] žlutě
filtr



Statická zk.: Zbytkový moment změřený v programu EXCEL



Statická zk.: Zbytkový moment změřený v programu DIAdem
